

Treball de Fi de Màster

Màster Universitari en Enginyeria Industrial

EROI i anàlisi de models energètics

MEMÒRIA

Autor: Sergi Catalán Sayol
Director: Daniel Suárez Cambra
Convocatòria: Juny 2019



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

El treball de fi de màster titulat com 'EROI i anàlisi de models energètics' versa sobre l'estudi del *statu quo* del model energètic i de les seves possibles alternatives.

Actualment es fa molt d'èmfasi en nous models energètics que basen la producció d'energia elèctrica amb fonts d'energies renovables per tal de reduir les emissions de gasos contaminants, però, són aquests models els adequats per als reptes del futur?

En el treball s'analitzarà quin és el model energètic actual i quins són els problemes d'aquest. De la mateixa manera, es farà un estudi de les alternatives de futur des de diferents punts de vista. Els aspectes a considerar seran la taxa de retorn energètic, la seva capacitat, l'impacte mediambiental que poden provocar, la seva equitat (és a dir, que la seva explotació beneficiï a gran part de la població) i si és una energia renovable o no ho és.

A partir d'aquest estudi es plantejarà una opinió personal de quin hauria de ser el camí a seguir per al disseny del model energètic.

Sumari

SUMARI	4
ÍNDIX DE FIGURES	7
ÍNDIX DE TAULES	8
ÍNDIX D'EQUACIONS	9
ÍNDIX DE GRÀFICS	10
1. PREFACI	11
1.1. Origen del projecte	11
1.2. Motivació	11
2. INTRODUCCIÓ	13
2.1. Objectius del projecte	13
2.2. Abast del projecte	13
3. ENERGIA	14
3.1. Energia primària	14
3.2. Energia elèctrica	15
4. L'ENERGIA ELÈCTRICA A ESPANYA	17
4.1. Recursos naturals de l'Espanya actual	17
4.2. Generalitats de la producció elèctrica	18
4.3. Energia hidràulica	23
4.4. Energia solar fotovoltaica	24
4.5. Energia eòlica	25
4.6. Energia nuclear.....	26
4.7. Energia del carbó.....	27
4.8. Energia del gas natural.....	28
4.9. L'energia elèctrica i la contaminació.....	29
5. NOU MODEL ELÈCTRIC	32
6. IMPACTE MEDIAMBIENTAL	36
6.1. Energia hidràulica	36
6.2. Energia fotovoltaica	37
6.3. Energia Eòlica.....	37

6.4.	Energia nuclear	38
6.5.	Energia del carbó	38
6.6.	Energia del gas natural	38
6.7.	Ecopunts	39
6.8.	Externalització de l'impacte ambiental	40
7.	EQUITAT DE LES ENERGIES	42
7.1.	Característiques principals	42
7.2.	Anàlisi de les principals fonts energètiques	43
7.2.1.	Energia hidràulica	43
7.2.2.	Energia solar fotovoltaica	43
7.2.3.	Energia eòlica	44
7.2.4.	Energia nuclear	44
7.2.5.	Energia del carbó	44
7.2.6.	Energia del gas natural	45
8.	EROI	46
8.1.	EROI i el desenvolupament humà	46
8.2.	Com definir i calcular l'EROI	48
8.2.1.	Càlcul literal	50
8.2.2.	Càlcul a partir de la intensitat energètica	50
8.2.3.	Càlcul de Murphy	51
8.3.	EROI de fonts energètiques	52
8.4.	EROI de la societat a Espanya	53
8.5.	Crítica al EROI i nova proposta	54
9.	PROGRAMA	56
9.1.	Procediment	56
9.2.	EROI real	57
9.3.	Formula	58
9.4.	Resultats	60
9.4.1.	Dades de partida	60
9.4.2.	EROI espanyol actual	62
9.4.3.	EROI espanyol futur. Factors de càrrega constants	63
9.4.4.	EROI espanyol futur. Demanda d'electricitat constant	65
9.4.5.	EROI i el factor de càrrega	66
CONCLUSIONS		71
AGRAÏMENTS		73

BIBLIOGRAFIA	74
Referències bibliogràfiques.....	74

Índex de figures

Figura 1: Evolució de l'ús d'energia primària [2]	14
Figura 2: Percentatge de producció d'electricitat per font energètica [2]	16
Figura 3: Grau de dependència energètica espanyola [24]	18
Figura 4: Evolució de la demanda elèctrica a Espanya. 2008-2017 [17]	18
Figura 5: Proporció entre energia renovable i no renovable a la Península [17]	19
Figura 6: Producció elèctrica a Espanya el 27/04/2019 [3]	22
Figura 7: Evolució de la potència instal·lada d'energia hidràulica a Espanya. Anys 2001-2017 [17]	24
Figura 8: Evolució de la potencia instal·lada a Espanya. Anys 2001-2017 [17]	24
Figura 9: Generació d'energia eòlica durant els mesos de 2013 fins 2017 [17].	25
Figura 10: Centrals nuclears a Espanya [22]	26
Figura 11: Emissions de CO ₂ en milions de tones de les centrals tèrmiques de carbó [4]	28
Figura 12: Evolució del percentatge energia renovable i no renovable i de la generació de CO ₂ a Espanya [17]	30
Figura 13: Percentatge de generació elèctrica renovable durant l'any 2017 a Europa [17]	31
Figura 14: Intercanvis internacionals d'electricitat durant l'any 2017 [17]	41
Figura 15: Corba de l'energia útil [7]	47
Figura 16: Piràmide de les necessitats energètiques [18]	48
Figura 17: Representació gràfica de tres càlculs d'EROI [8]	49
Figura 18: Nivells de costos energètics [9]	50

Índex de taules

Taula 1: Consum d'electricitat mundial repartit per regió [2].....	15
Taula 2: Generació elèctrica i potència instal·lada [17]	20
Taula 3: Factor de càrrega a Espanya l'any 2017	21
Taula 4: Factors de càrrega mitjos de les tecnologies més comunes [23]	23
Taula 5: Evolució de l'energia instal·lada des de l'any 2017 fins l'any 2030 [6].....	33
Taula 6: Increment de la generació elèctrica entre l'any 2017 i l'any 2030.....	34
Taula 7: Resum dels Ecopunts de les fonts energètiques principals [15].....	39
Taula 8: Resum dels valors d'EROI de les Font energètiques més importants [8].....	52
Taula 9: Taula resum dels EROIs de les principals fonts energètiques [8]	53
Taula 10: Taula per a càlcul de l'EROI real	57
Taula 11: Costos monetaris de l'energia eòlica [13]	61
Taula 12: Costos monetaris de l'energia hidràulica [13]	61
Taula 13: Costos monetaris de l'energia solar [13].....	61
Taula 14: Costos monetaris de l'energia nuclear [14].....	61
Taula 15: Costos monetaris de l'energia del carbó [14].....	62
Taula 16: Costos monetaris de l'energia del gas natural [14].....	62
Taula 17: EROI extens de les energies analitzades	63
Taula 18: EROI extens de les energies analitzades en el primer cas de futur	64
Taula 19: EROI extens de les energies analitzades en el segon cas de futur.....	65

Índex d'equacions

Equació 1: Equació factor de càrrega	20
Equació 2: Segona expressió del factor de càrrega	21
Equació 3: EROI	46
Equació 4: Intensitat energètica	51
Equació 5: Càlcul d'EROI a partir del cost invertit i la intensitat energètica	51
Equació 6: Forma extensa del numerador de l'equació de l'EROI	58
Equació 7: Desenvolupament del numerador de l'equació de l'EROI	58
Equació 8: Expressió reduïda del numerador de l'EROI	58
Equació 9: Desenvolupament del denominador de l'equació de l'EROI	59
Equació 10: Expressió dividida en energia fixa i variable	59
Equació 11: Expressió amb els coeficients de Murphy	59
Equació 12: Expressió amb el cost variable unitari	59
Equació 13: Expressió ampliada del denominador de l'EROI	59
Equació 14: Expressió final de l'EROI	60

Índex de gràfics

Gràfic 1: Representació de la potencia instal·lada vs l'EROI extens de l'energia solar fotovoltaica.....	64
Gràfic 2: EROI vs factor de càrrega en l'energia eòlica.....	67
Gràfic 3: EROI vs factor de càrrega en l'energia hidràulica.....	67
Gràfic 4: EROI vs factor de càrrega en l'energia solar	68
Gràfic 5: EROI vs factor de càrrega en l'energia nuclear	68
Gràfic 6: EROI vs factor de càrrega en l'energia del carbó	69
Gràfic 7: EROI vs factor de càrrega en l'energia del gas natural.....	69

1. Prefaci

1.1. Origen del projecte

El clima de la Terra sempre ha estat canviant però, en poques ocasions, mai tant de pressa com en l'actualitat.

En només 250 anys la temperatura ha augmentat 1°C i els experts asseguren que, al ritme actual, la temperatura haurà augmentat un altre grau més i, com a mínim, tres graus més a finals de segle [19].

Aquest canvi és, en gran part, conseqüència dels gasos d'efecte hivernacle derivats de l'activitat humana. Des de la revolució industrial la quantitat de diòxid de carboni, metà, ozó, clorofluorocarboni i òxid nitrós ha augmentat en l'atmosfera.

Els efectes del canvi climàtic poden ser de diferents índoles: pujada del nivell del mar, canvis de sistemes ecològics, disminució de la productivitat agrícola, salut, entre altres. Per aquest motiu s'han firmat diferents tractats i convenis per tal de mitigar aquests fets com per exemple el Protocol de Kyoto o l'Acord de Paris [1].

A escala mundial, el consum d'energia representa la major font d'emissió de gasos d'efecte hivernacle procedent de les activitats humanes. S'estima que al voltant de dues terceres parts de les emissions mundials estan relacionades amb la crema de combustibles fòssils que s'usen per a la calefacció, l'electricitat, el transport i la indústria.

En aquest context es fa evident que un canvi de model energètic és necessari per revertir la situació actual. Nous models basats en energies renovables com l'energia fotovoltaica, l'energia hidràulica, l'energia eòlica o l'energia termosolar. Però, són suficient aquestes energies per a canviar la situació actual? Són suficients aquestes energies per a cobrir la demanda d'energia actual? Són 100% renovables? Quin impacte mediambiental tenen?

Per altra banda, aquest treball forma part de l'inici d'una línia de recerca coordinada pels professors Daniel Suárez i Jordi Freixa en el qual es volen estudiar sistemes energètics en funció de diversos paràmetres.

1.2. Motivació

La principal motivació d'aquest treball ve donada per la situació social actual. Gran part de la població mundial demana un canvi de model energètic per a ser més responsables amb

el medi ambient i sostenibles.

L'aposta per part de les administracions és reduir les emissions de gasos contaminants substituint la producció d'energia convencional adquirida a partir de combustibles fòssils per la provinent de l'energia hidràulica, eòlica i solar [6]. Malgrat això, la inversió en energia renovable ha patit un estancament, sobretot, degut a la crisi econòmica del 2008. De l'any 2013 al 2017, la potència instal·lada a Espanya d'energia solar, eòlica i hidràulica no va augmentar [17].

Per altra banda, experts es mostren escèptics sobre les conseqüències d'apostar únicament per la via de la transformació de la producció energètica sense fer un estudi més profund sobre la tecnologia disponible al mercat [20].

2. Introducció

2.1. Objectius del projecte

L'objectiu del projecte és avaluar el model energètic actual i el model energètic alternatiu que existeixen avui dia des del punt de vista de la taxa de retorn energètic, la capacitat, l'impacte mediambiental i la equitat de l'energia.

2.2. Abast del projecte

Un aspecte important a considerar és que degut a la data de començament d'aquest projecte, les últimes dades fiables per a realitzar l'estudi daten de l'any 2017.

També cal considerar que per a la simplificació del càlcul de l'EROI es consideraran dades econòmiques que es transformaran en dades energètiques.

Els càlculs realitzats es centraran a nivell estatal d'Espanya i no mundial per tal de simplificar la recerca i l'anàlisi de dades.

3. Energia

Els éssers humans usem l'energia de diferents maneres per a satisfer les nostres necessitats. Ja sigui transformant l'energia nuclear continguda en una barra d'urani en energia elèctrica o l'ús de l'energia hidràulica per a moldre blat.

L'energia pot ser utilitzada directament en forma d'energia primària o com a energia secundària. L'energia primària és aquella que es troba de forma espontània en la naturalesa i pot ser de caràcter renovable, fòssil o nuclear. L'energia secundària és aquella que s'obté mitjançant una o varies transformacions a partir d'energia primària. Per exemple, l'energia elèctrica és una energia secundària i s'obté a partir de diferents fonts d'energia primària, com poden ser l'energia hidràulica o l'energia tèrmica.

3.1. Energia primària

Les fonts d'energia primària són aquelles de les quals es pot obtenir energia de manera directa de la naturalesa entre les quals es troben l'energia humana i animal, l'energia hidràulica, la eòlica, la química, la nuclear, la solar i la terrestre.

La demanda d'energia primària ha augmentat de forma continuada d'ençà la revolució industrial a finals del segle XVIII fins a un consum actual de $13,5 \cdot 10^9$ tep [2] equivalent a 157135 TWh.

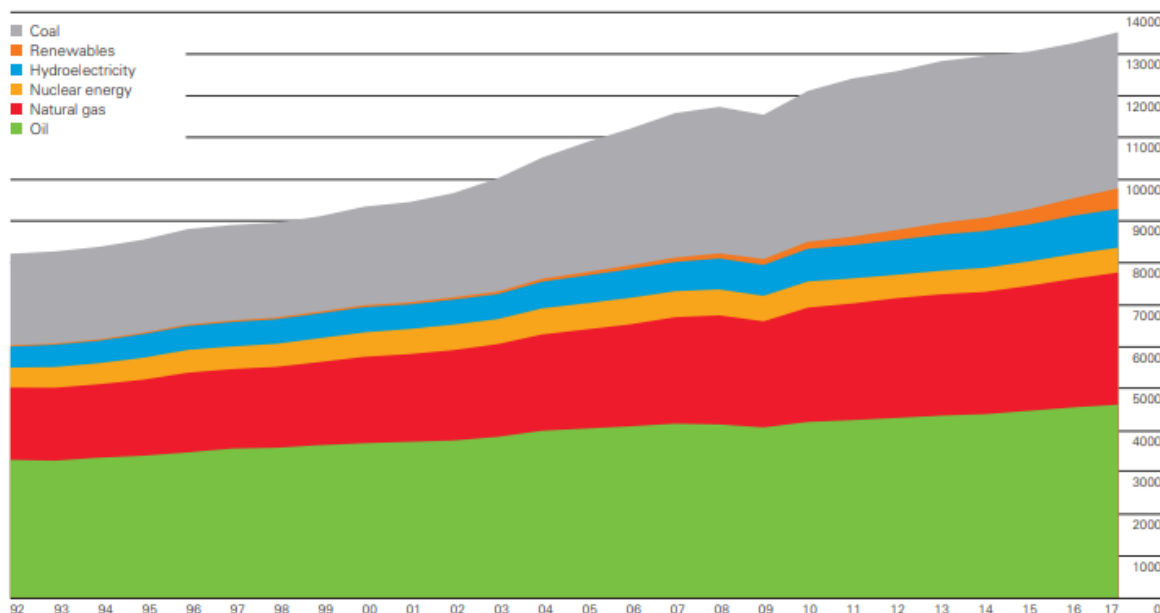


Figura 1: Evolució de l'ús d'energia primària [2]

En la Figura 1 es pot observar l'augment de consum energètic, que en 25 anys augmenta un 69%. També es pot apreciar el retrocés en la demanda energètica que es va produir al 2008 després de la fallida del banc Lehman Brothers i la conseqüent crisi econòmica.

3.2. Energia elèctrica

L'energia elèctrica és l'energia produïda per el flux de càrregues elèctriques entre dos punts amb una diferència de potencial. Aquest tipus d'energia és considerada com a energia secundària ja que s'aconsegueix a partir de transformacions de l'energia primària, tal i com s'ha comentat en l'apartat 3.1.

L'energia elèctrica es pot dividir en dos grans grups, procedent d'energies renovables i procedent d'energies no renovables.

Es denominen com a energies renovables aquelles energies que s'obtenen de fonts naturals virtualment inesgotables ja sigui per la immensa quantitat d'energia que contenen o perquè son capaces de regenerar-se per medis naturals. Així doncs, l'energia elèctrica procedent de l'energia hidràulica, l'energia eòlica i l'energia solar es considera renovable i l'energia elèctrica provinent de l'energia del carbó, petroli, gas natural o combustible nuclear es considera com a no renovable.

Durant l'any 2017 al mon es van consumir 25551,3 TWh d'energia elèctrica [2] que van quedar repartits de la següent manera:

REGIÓ	CONSUM D'ELECTRICITAT (TWH)
AMÈRICA DEL NORD	5290,2
AMÈRICA DEL SUD I CENTRAL	1315,8
EUROPA	3901,3
CIS	1539,5
ORIENT MITJÀ	1210,9
AFRICA	830,7
ÀSIA-PACÍFIC	11462,9

Taula 1: Consum d'electricitat mundial repartit per regió [2]

Es pot observar com la regió Àsia-Pacífic és la que consumeix més electricitat en el mon,

això és degut a que conté els dos països més poblats, Xina i Índia.

Cada regió té un mix energètic diferent en funció del seu desenvolupament i dels seus recursos naturals.

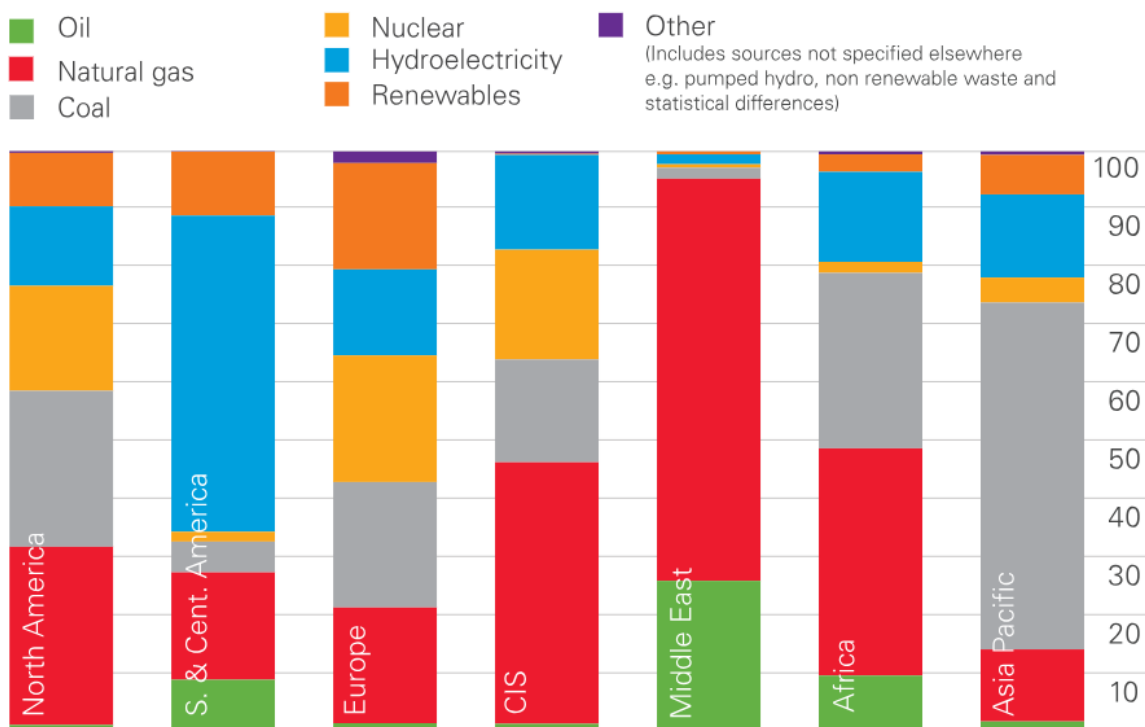


Figura 2: Percentatge de producció d'electricitat per font energètica [2]

A la Figura 2, es poden observar diferents peculiaritats de cada regió. En primer lloc, la regió de l'Orient Mitjà és rica en petroli i gas natural, per tant és normal que més d'un 90% del seu mix energètic estigui proporcionat per aquestes dues fonts. També roman palesat que la regió Centre i Sud d'Amèrica obté gran part de l'electricitat amb energia hidràulica degut a que s'hi pot trobar el riu més llarg i caudalós del món, el riu Amazonas. Per últim, cal mencionar que la regió d'Europa és la més equilibrada pel que fa al mix energètic, amb la majoria de les fonts aportant entre un 18% i un 22% del total de l'electricitat.

4. L'energia elèctrica a Espanya

En aquest apartat s'explicarà la generació d'electricitat a Espanya (mix energètic), els recursos naturals que posseeix el país i es posarà en context per a entendre la evolució del model energètic.

4.1. Recursos naturals de l'Espanya actual

El clima d'Espanya és molt divers i varia en funció de la localització geogràfica. Pel que fa a les precipitacions, es pot trobar 800mm l'any de mitja al País basc i Galícia o menys de 300mm l'any a zones més càlides com Almeria o Murcia. De manera anàloga, es pot deduir que les zones amb més radiació solar són les que menys precipitacions tenen, amb més de 5kWh/m², i les que menys en tenen amb menys de 3,8kWh/m² [21] de mitjana diària anual. Per últim, pel que fa al vent, les zones on la velocitat mitja és més alta són el sud d'Andalusia, nord de Catalunya i nord de Galícia.

Pel que respecte als recursos fòssils, Espanya importa la gran majoria dels recursos que consumeix. L'estat no posseeix una quantitat significativa de carbó, gas natural, petroli ni urani i només una petita part de la generació elèctrica es fa amb recursos propis. Aquest fet fa que Espanya sigui un país molt dependent de les importacions per a generar electricitat.

De fet, encara que des de l'any 2007 la tendència és positiva i s'està reduint la dependència, aquesta segueix sent molt alta tal i com es pot observar en la Figura 3. En aquesta figura es pot observar en el eix de les y la dependència energètica espanyola en percentatge i en el eix de les x els anys.

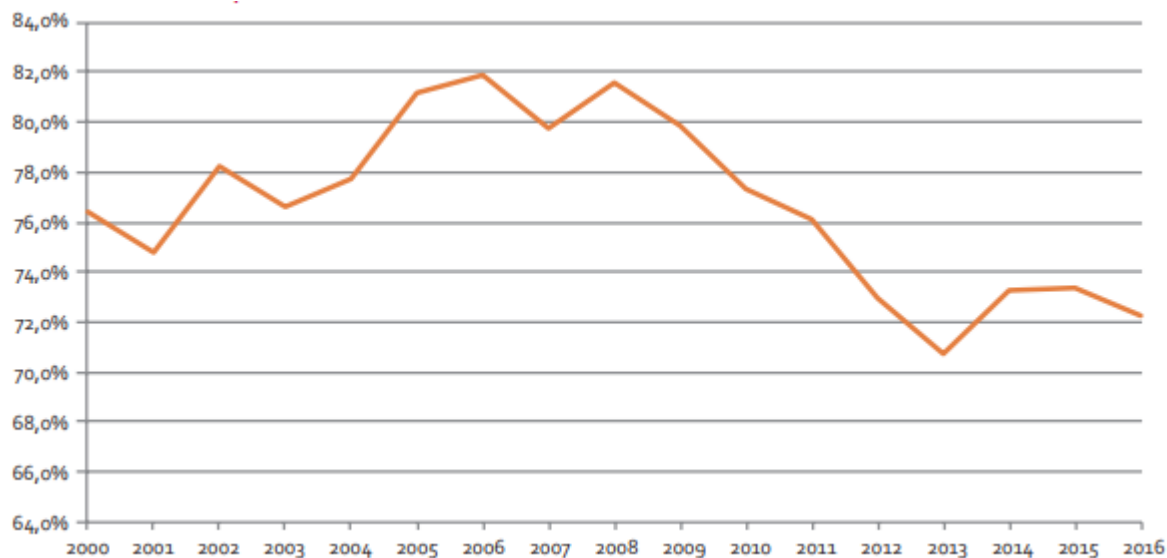


Figura 3: Grau de dependència energètica espanyola [24]

4.2. Generalitats de la producció elèctrica

De la mateixa manera que a la resta del món, la demanda d'energia elèctrica ha augmentat d'ençà de la revolució industrial però ha patit retrocessos en èpoques de crisi. Aquest fet es pot observar en la Figura 4, com la demanda a la península ibèrica baixa de 265 TWh al 2008 fins a 244 TWh al 2014.

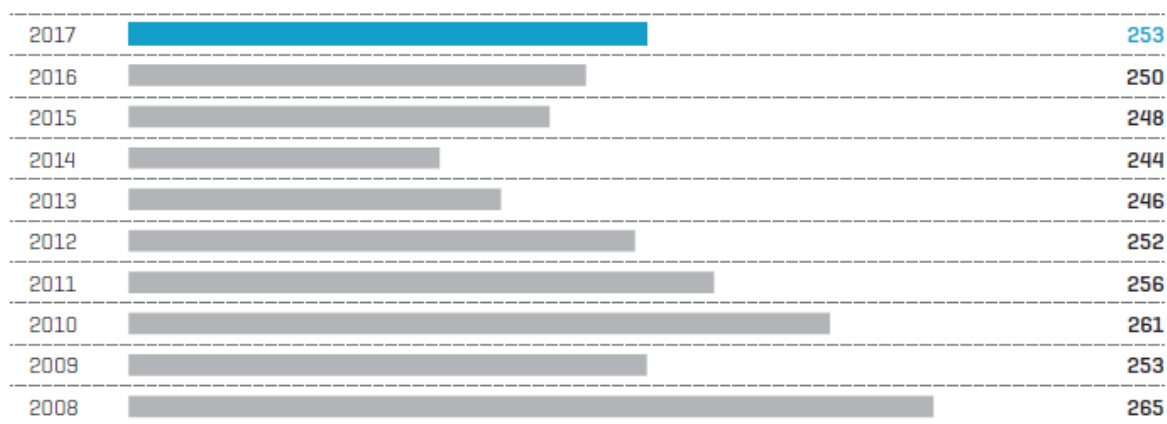


Figura 4: Evolució de la demanda elèctrica a Espanya. 2008-2017 [17]

La generació d'energia elèctrica a Espanya es produeix a partir de diferents fonts, tant renovables com no renovables.

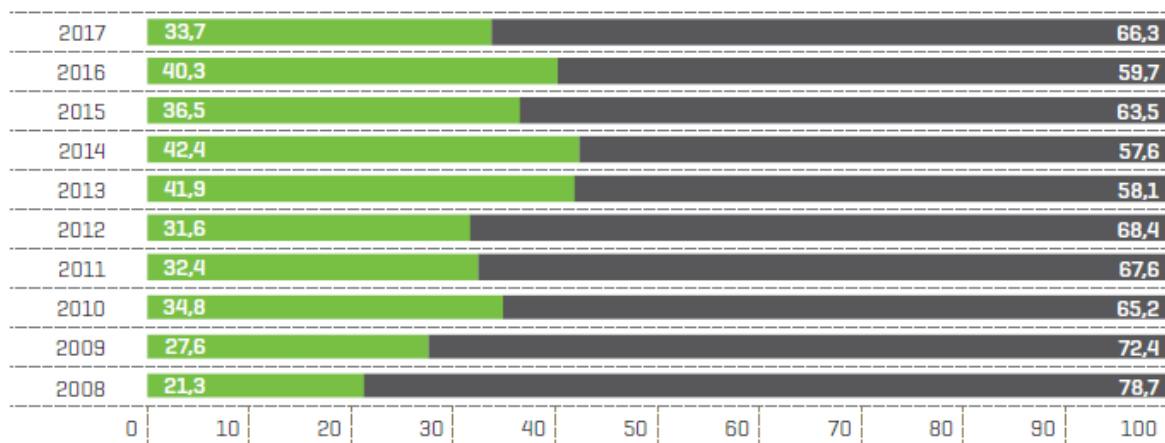


Figura 5: Proporció entre energia renovable i no renovable a la Península [17]

En la Figura 5 es pot observar com varia en els últims anys la proporció entre els dos tipus d'energia elèctrica. Clarament, la generació elèctrica a la Península Ibèrica és de caràcter no renovable, un 66% en front d'un 33% l'any 2017. A més, en la taula inferior, roman pal·lesat que l'energia nuclear és la més utilitzada en l'Estat Espanyol, seguida de l'energia eòlica.

TIPUS D'ENERGIA	GENERACIÓ (GWH)	POTÈNCIA INSTAL·LADA (MW)
HIDRÀULICA	18364	17032
BOMBEIG	2249	3329
NUCLEAR	55609	7117
CARBÓ	45196	10004
FUEL/GAS	7011	2490
CICLE COMBINAT	37296	26670
HIDROEÒLICA	20	11
EÒLICA	47897	23132
SOLAR FOTOVOLTÀICA	8385	4687
SOLAR TÈRMICA	5348	2304
ALTRES RENOVABLES	3614	858
COGENERACIÓ	28170	5828
RESIDUS NO RENOVABLES	2608	497
RESIDUS RENOVABLES	877	162
GENERACIÓ TOTAL	262645	104122

Taula 2: Generació elèctrica i potència instal·lada [17]

Amb els valors de potència instal·lada i de generació de cada energia es pot calcular el factor de càrrega segons la formula següent:

$$\text{Factor de càrrega} = \frac{\text{Energia produïda}}{\text{Potència instal·lada} * 24 * 365}$$

Equació 1: Equació factor de càrrega

Aquest valor indica una proporció entre la quantitat d'energia produïda per una central entre

la quantitat d'energia que podria haver produït treballant durant tota la estona en el mateix interval de temps.

El factor de càrrega també es pot expressar de la següent manera:

$$\text{Factor de càrrega} = \frac{\text{hores de generació d'energia en un any}}{\text{hores equivalents de generació al 100\% de potència}}$$

Equació 2: Segona expressió del factor de càrrega

TIPUS D'ENERGIA	FACTOR DE CÀRREGA (%)
HIDRÀULICA	12,3
BOMBEIG	7,71
NUCLEAR	89,2
CARBÓ	51,6
FUEL/GAS	32,1
CICLE COMBINAT	15,9
HIDROEÒLICA	20,8
EÒLICA	23,6
SOLAR FOTOVOLTÀICA	20,4
SOLAR TÈRMICA	26,5
ALTRES RENOVABLES	48,1
COGENERACIÓ	55,2
RESIDUS NO RENOVABLES	59,9
RESIDUS RENOVABLES	61,8

Taula 3: Factor de càrrega a Espanya l'any 2017

En la Taula 3 queda reflectit com l'energia nuclear és la que opera durant un temps més elevat.

Els factors de càrrega depenen principalment del recurs natural que la font energètica utilitza per a generar energia elèctrica i dels costos fixos i variables de la producció d'aquesta energia. Si una energia té costos fixos elevats i costos variables baixos, es considera que és una tecnologia base, si, per altra banda, l'energia té costos fixos baixos i costos variables elevats, es considera com a tecnologia punta. A continuació s'exposen dos exemples:

- Per una banda, l'energia solar fotovoltaica és una energia que només produeix electricitat durant les hores de sol. Per tant produirà energia durant un màxim de 12 hores. Actualment és considerada com una tecnologia de base en el sistema elèctric espanyol degut al seu cost variable casi nul.
- Altrament, l'energia nuclear té elevats costos fixos i baixos costos variables, per tant, se la considera una tecnologia base. D'aquesta manera, sempre estarà proporcionant electricitat degut a que és molt car connectar i desconnectar aquesta energia.

En la Figura 6 es pot observar el fet explicat anteriorment. En l'eix de les x s'hi pot veure la hora del dia i en l'eix de les y s'hi representa la potència en MW.

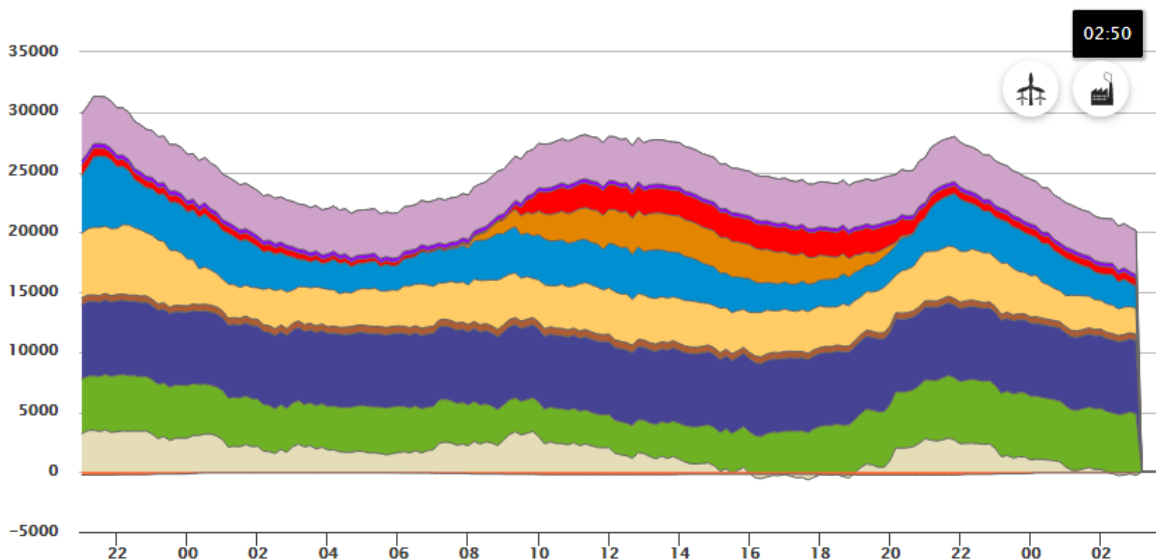


Figura 6: Producció elèctrica a Espanya el 27/04/2019 [3]

Mentre que l'energia nuclear (representada amb lila fosc) es manté constant al llarg de tot el dia, es pot observar com l'energia solar fotovoltaica (representada amb taronja) només

produeix electricitat durant el dia. També roman palesat que l'energia hidràulica (de color blau fluix) varia al llarg del dia per adaptar-se a la demanda.

Finalment, cada país escull quins tipus d'energia utilitzarà i, per tant, els factors de càrrega poden variar segons cada regió. Ara bé, a continuació s'exposa en la Taula 4 un resum de factors de càrrega estàndard en el món.

TIPUS D'ENERGIA	FACTOR DE CÀRREGA (%)
HIDRÀULICA	60
FOTOVOLTAICA	10-30
NUCLEAR	60-98
CARBÓ	70-90
EÒLICA	20-40
CICLE COMBINAT	60

Taula 4: Factors de càrrega mitjos de les tecnologies més comunes [23]

4.3. Energia hidràulica

L'energia hidràulica és l'energia provinent de l'aigua. A partir de l'energia potencial o de l'energia cinètica del cabal d'aigua s'aconsegueix electricitat mitjançant una turbina.

Espanya és un dels països europeus on la aportació de l'energia hidràulica sobre el mix energètic és més baixa, aquesta contribució va ser del 7%.

La gran capacitat de gestió que permet aquesta energia fa que es consideri com una tecnologia de punta, aportant energia en els moments de més demanda.

L'energia hidràulica és un recurs molt variant al llarg del temps. Aquesta energia pot generar a Espanya 40000GWh els anys més humits, però els anys més secs, com el 2017, la generació pot caure a la meitat (18400GWh l'any 2017).

La potència instal·lada d'aquest tipus d'energia ha augmentat molt poc en els últims anys, això és degut a que les millors zones hidroelèctriques ja tenen centrals. Com es pot observar en la Figura 7, la potència instal·lada des de 2001 és gairebé la mateixa.

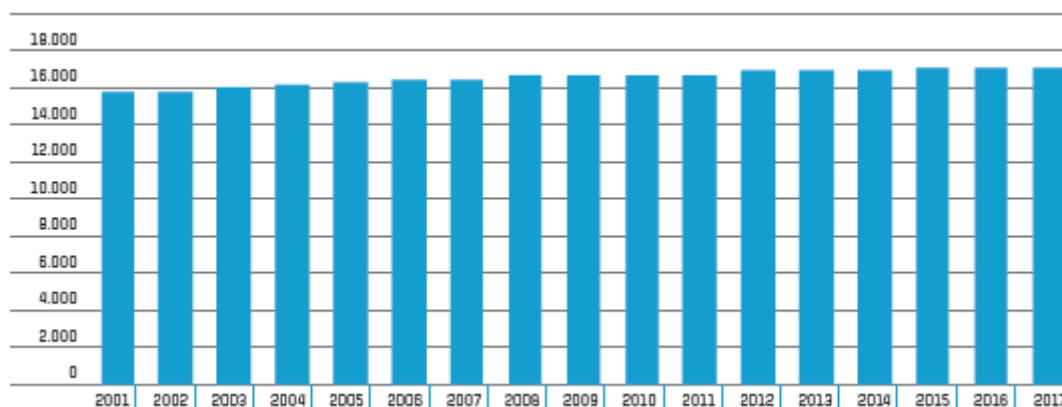


Figura 7: Evolució de la potència instal·lada d'energia hidràulica a Espanya. Anys 2001-2017 [17]

Les comunitats autònomes que més electricitat generen a partir de l'aigua són Castella-Lleó i Galícia, amb un 25,8% i un 21,7% respectivament.

4.4. Energia solar fotovoltaica

L'energia solar fotovoltaica s'obté a partir de la radiació solar mitjançant un dispositiu semiconductor que transforma l'energia provinent del Sol en energia elèctrica.

L'energia solar fotovoltaica és la tercera de les renovables pel que fa a potència instal·lada i representa un 6,7% del total de la potència instal·lada [17]. Aquest tipus d'energia és la que més ha augmentat en els últims anys, tal i com es pot comprovar en la Figura 8.

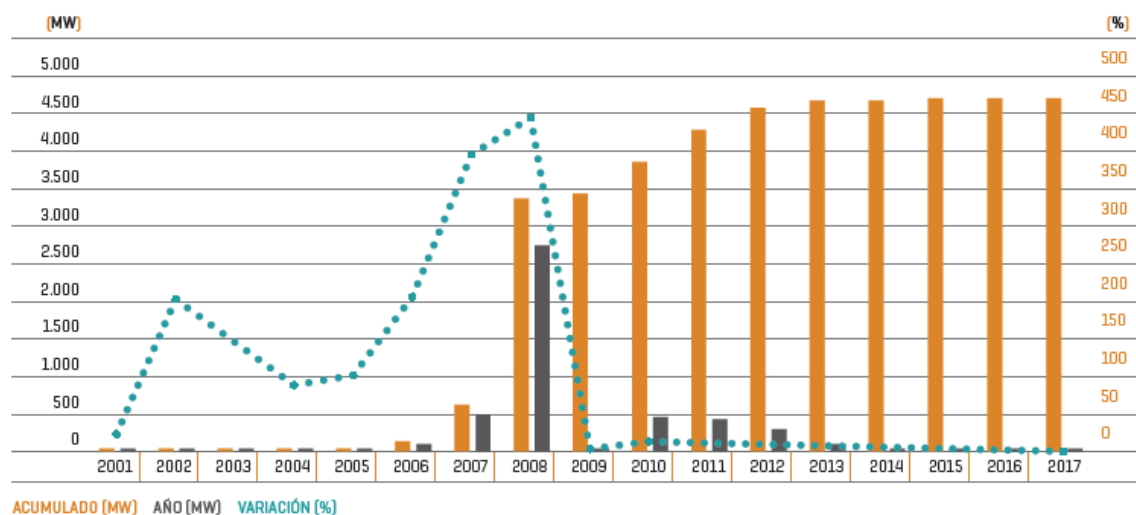


Figura 8: Evolució de la potència instal·lada a Espanya. Anys 2001-2017 [17]

Les comunitats autònomes amb més potència instal·lada són Castella - la Manxa, Andalusia, Extremadura i Castella-Lleó que concentren el 61% de les instal·lacions d'aquest tipus d'energia.

Pel que fa a la generació, durant el 2017 aquesta energia va aportar al mix energètic espanyol un total de 8000GWh, fet que posiciona a Espanya com un dels països europeus on l'aportació d'energia solar és més alta.

4.5. Energia eòlica

L'energia elèctrica provinent de l'energia eòlica és aquella electricitat obtinguda a partir de l'energia cinètica del vent.

L'energia eòlica és la principal font renovable de l'estat espanyol i la segona pel que fa al conjunt d'energies.

Espanya és el segon país d'Europa amb més potència instal·lada i el cinquè en contribució al mix energètic.

La gran variabilitat d'aquesta energia en la cobertura horària de la demanda fa que la seva participació oscil·li entre el 1% (el 24 de març de 2017 a les 11 del matí) i el 68,5% (el 27 de desembre del mateix any a les quatre del matí). En la Figura 9 es pot observar la variabilitat en diferents mesos durant quatre anys.

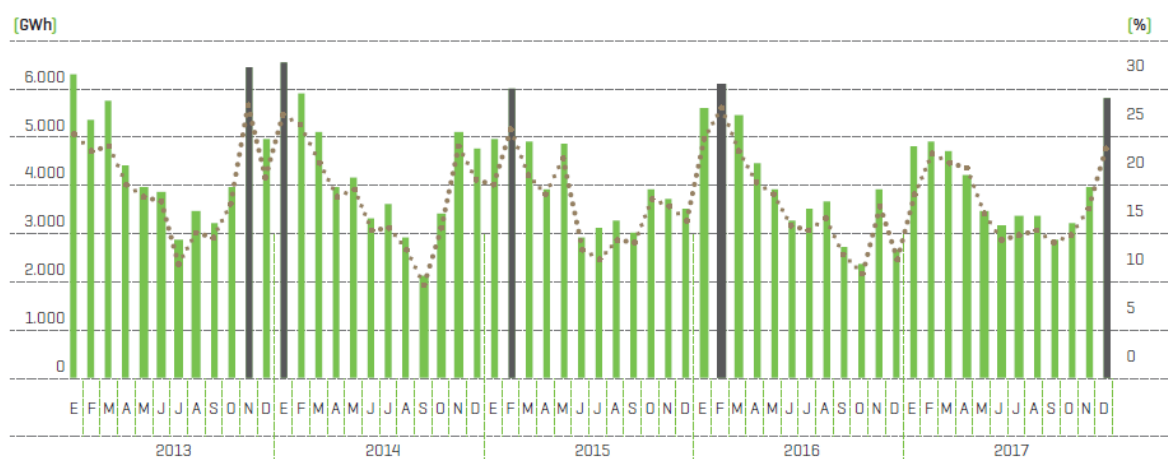


Figura 9: Generació d'energia eòlica durant els mesos de 2013 fins 2017 [17].

4.6. Energia nuclear

L'energia nuclear és aquella que s'obté a partir de la fissió d'un àtom, normalment l'urani. La calor alliberada per aquest procés és absorbida per l'aigua del refrigerant. Aquesta calor permet establir un cicle de Rankine que mou un conjunt turbina-alternador que genera electricitat.

L'energia nuclear és la font principal d'Espanya aportant un total de 55609GWh. Aquesta energia és produïda a partir de 7 reactors. A més, hi ha un reactor desconnectat i dos que estan en desmantellament. En la Figura 10 es poden observar les centrals en actiu de color vermell i les centrals desconnectades i en desmantellament de color gris.



Figura 10: Centrals nuclears a Espanya [22]

Espanya no té previst tancar reactors nuclears en els propers anys i mantindrà les centrals actuals per sobre dels 40 anys de vida.

El combustible necessari per a produir energia d'aquest tipus prové de Níger, Rússia, Austràlia, Namíbia i Uzbekistan. Aquests països van aportar un total de 286 tones durant l'any 2017.

L'energia nuclear sempre ha sigut molt polèmica. Tot i no produir gasos contaminants, els residus de les centrals nuclears són radioactius i, per tant, perillosos per a la salut pública.

En una enquesta duta a terme pel diari 'El País' [4], s'arribava a la conclusió que Espanya era antinuclear però per poc. A la pregunta de si Espanya havia d'abandonar l'energia nuclear, el 49% dels enquestats es mostraven d'acord en front del 46% que estaven en desacord, però el 46% creien que les centrals tenen més avantatges que inconvenients en front del 43% que opinaven el contrari. Altres respostes curioses eren que el 57% dels enquestats creien que l'energia nuclear és molt o bastant segura però el 74% no les volia tenir a prop i el 96% creia que s'havien de revisar les mesures de seguretat de les centrals espanyoles.

4.7. Energia del carbó

L'electricitat procedent del carbó s'obté a partir de la combustió d'aquest material que allibera calor i, mitjançant un cicle termodinàmic, la calor és aprofitada per a moure un generador d'electricitat.

Durant l'any 2017, Espanya va generar uns 45000GWh d'energia elèctrica a partir del carbó, aportant el 17% de l'electricitat peninsular [17]. Actualment les centrals tèrmiques de carbó es consideren com una tecnologia de punta i s'utilitzen per a cobrir la demanda quan la generació és insuficient. Així doncs, és normal que el seu factor de càrrega sigui baix i molt variant al llarg dels anys. El principal motiu d'aquest fet és el preu per les emissions de CO₂ a l'atmosfera.

Com ja s'ha comentat anteriorment, Espanya és un país que depen molt de les importacions i, pel que fa al carbó n'obté fins a un 86% de l'exterior [4] que prové de Colòmbia, d'Indonèsia, de Rússia, de Sud-Àfrica i d'EUA. A més, per a l'any 2019 aquesta xifra augmentarà ja que a principis d'any van tancar diverses mines de carbó del país. La mineria espanyola ha aconseguit mantenir-se gràcies a ajudes europees, però degut a les noves polítiques i a l'acord arribat l'any 2010, aquestes han hagut de tancar.

Igualment, Espanya seguirà produint electricitat a partir de carbó tot i que la tendència per al futur és disminuir, o fins i tot eliminar la seva participació en el mix energètic. De les 15 centrals tèrmiques de carbó que existeixen en la actualitat a Espanya, 9 tancaran en el pròxim any i mig [4].

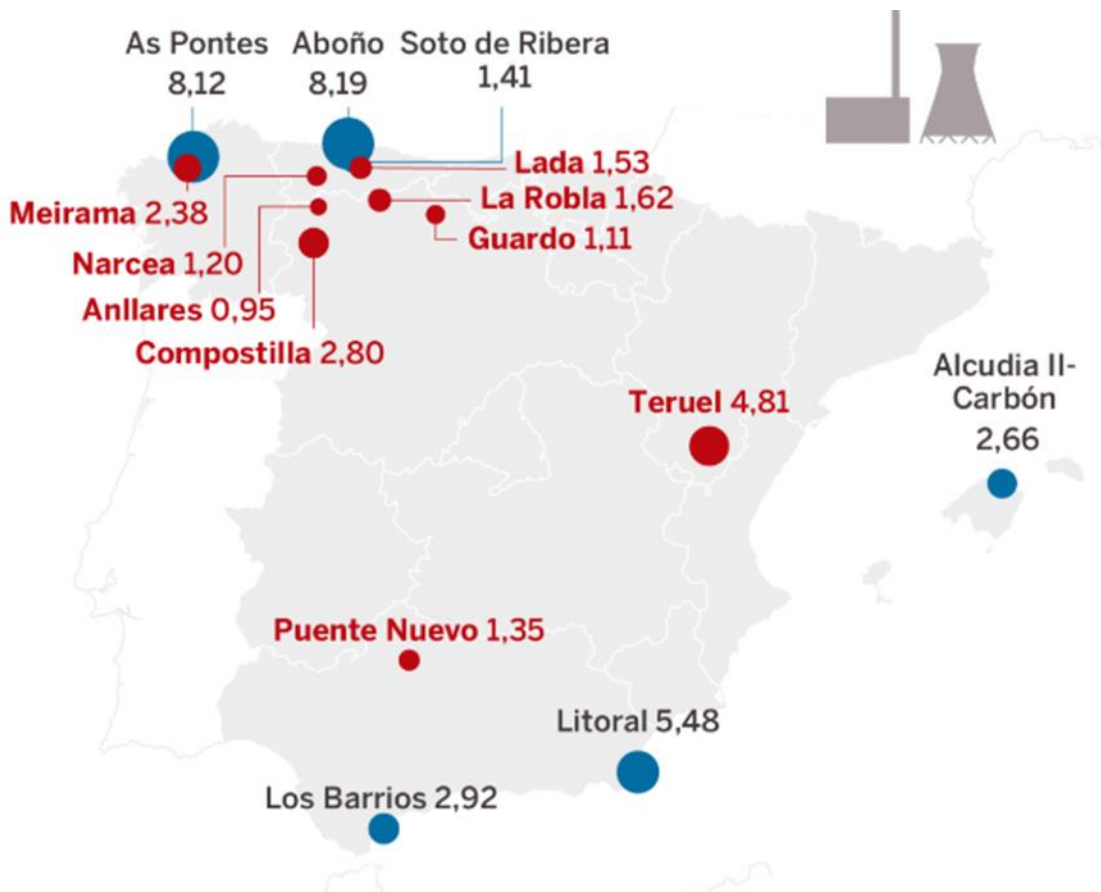


Figura 11: Emissions de CO₂ en milions de tones de les centrals tèrmiques de carbó [4]

En la Figura 11 de sobre es pot observar la quantitat de milions de tones que emeten les centrals tèrmiques de carbó. A més, de color blau estan pintades aquelles centrals que sobreviuran al 2020 i de color vermell aquelles que hauran de tancar.

4.8. Energia del gas natural

De la mateixa manera que el carbó, el gas natural produeix electricitat transformant la calor alliberada en el procés de combustió en electricitat a partir d'un cicle termodinàmic.

Com a conseqüència de que el gas natural emet 350g/kWh, mentre que el carbó n'emet 550g/kWh de més, l'any 2017 la generació d'energia elèctrica a partir del gas natural va estalviar emissions de CO₂ a l'atmosfera respecte a si s'hagués produït la mateixa energia amb carbó. Aquest fet fa que cada cop s'aposti més per aquesta tecnologia en front de l'energia provinent del carbó.

Tot i el que s'ha comentat en l'anterior paràgraf, les centrals de cicle combinat són les que tenen un factor de càrrega més baix i, per tant, són les que s'utilitzen menys en comparació

al que podrien aportar. Algunes centrals com les de El Fangal, Escatrón Peaker o Palos 1 han treballat per sota del 1% de la seva càrrega, mentre que altres (com la de Màlaga) ha treballat al voltant del 50%.

Entre els anys 2002 i l'any 2016 la potència instal·lada de cicle combinat ha passat d'uns 2800MW a 26600MW, multiplicant-se gairebé per deu vegades.

Espanya obté el gas natural de països com Algèria, Nigèria, França, Perú o Qatar. Però gairebé el 50% prové del primer país.

4.9. L'energia elèctrica i la contaminació

Com ja s'ha comentat en anteriors apartats, la producció energètica ve lligada amb la contaminació. Principalment això és degut a la crema de combustibles fòssils que estan formats per molècules de carboni, nitrogen, sofre, entre d'altres, que al reaccionar amb l'oxigen provoquen gasos contaminants. Així doncs, l'energia elèctrica provinent del petroli, carbó i gas natural es considera contaminant pel fet explicat.

Pel que fa a l'energia nuclear, aquesta no genera gasos contaminants però els seus residus són perjudicials per a la salut degut a la radioactivitat. Així doncs, tampoc es considera una energia neta.

Les energies renovables, o també anomenades energies verdes, no generen gasos contaminants ni residus durant la producció d'energia elèctrica. Tot i així, caldria considerar que se'n fa dels materials necessaris per a les plaques solars o les turbines eòliques.

Com es pot observar en la Figura 12, España genera al voltant del 70% de l'energia elèctrica amb energia no renovable, fet que provoca la emissió de 75 milions de tones de CO₂ anuals [17].

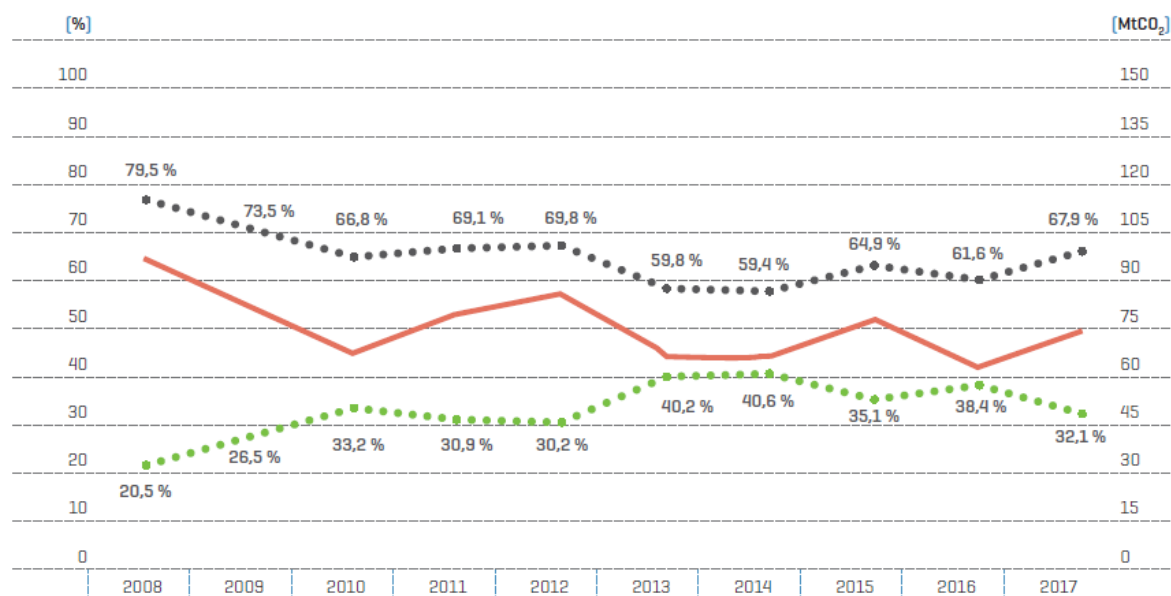


Figura 12: Evolució del percentatge energia renovable i no renovable i de la generació de CO₂ a Espanya [17]

Evidentment, les èpoques de més generació elèctrica a partir de fonts renovables, coincideixen amb les etapes de menys generació de gasos contaminants i viceversa.

La producció d'energia elèctrica a partir d'energies renovables depèn molt de la climatologia. Per aquest motiu, en èpoques de sequera, de baixos vents o dies de núvol la producció d'energia elèctrica verda disminueix, augmentant la generació de CO₂. Aquest fet es pot comprovar en l'any 2017, on la generació d'energia hidràulica va disminuir degut a la sequera.

En termes relatius de producció elèctrica a partir d'energia renovable, Espanya es troba a mitja taula, amb valors semblants als de Portugal o Alemanya, però queda molt per sota de països com Islàndia o Albània amb una producció elèctrica renovable del 100%. Ara bé, és complicat comparar aquests valors ja que cada país disposa d'un clima diferent i d'unes necessitats i uns recursos també diferents.

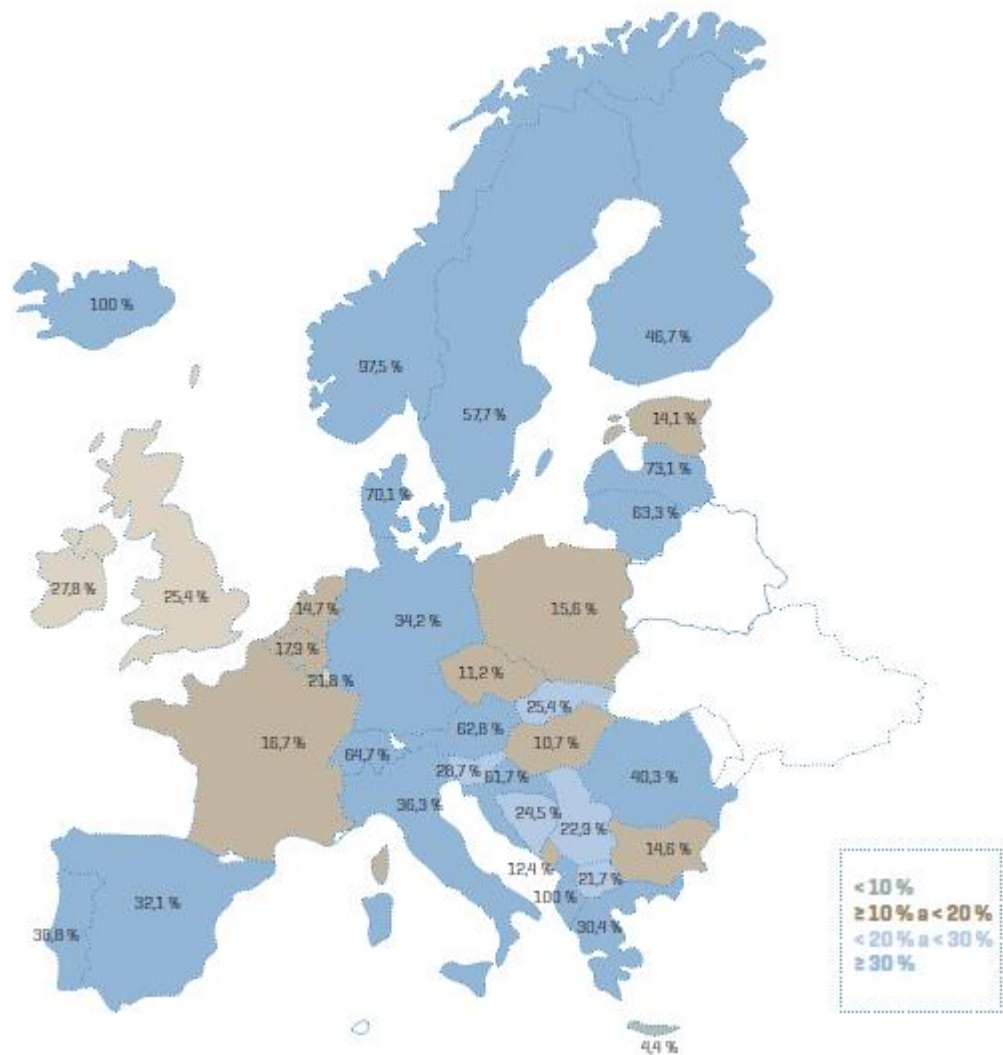


Figura 13: Percentatge de generació elèctrica renovable durant l'any 2017 a Europa [17]

Per a fer una comparació més efectiva de la situació d'Espanya, es pot agafar com a exemple Itàlia. Itàlia és un país semblant pel que fa a recursos naturals i clima, a més, té una producció d'energia elèctrica semblant (295,4TWh a Itàlia per els 262,6TWh espanyols). Pel que es pot observar en la Figura 13, té un percentatge de generació d'electricitat de fonts renovables semblant a l'espanyol. Per tant, es podria considerar que Espanya no és un país endarrerit en l'aspecte de les energies renovables.

Un cop roman palesat que la producció elèctrica està relacionada amb la contaminació, perquè és necessari canviar el model elèctric?

5. Nou model elèctric

La política energètica i climàtica espanyola ve determinada per la Unió Europea i aquesta està condicionada per un context global en el qual destaca l'Acord de Paris com el més recent i ambiciós. Per adaptar la generació d'energia a aquest context, Espanya ha redactat el Pla Nacional Integrat d'Energia i Clima (PNIEC) [6].

El PNIEC és un escrit on s'exposa quin ha de ser el canvi del sector energètic a diferents nivells (transport, generació d'electricitat, sector industrial, entre d'altres).

Un dels aspectes claus que tracta aquest document és la reducció de les emissions de diòxid de carboni que per a l'any 2030 el valor haurà de ser de 19 milions de tones, és a dir un decreixement de 45 milions de tones de CO₂ aproximadament. Aquest objectiu es vol aconseguir mitjançant la incorporació massiva de fonts d'energia renovable fins a aconseguir un mix elèctric en el qual aquestes fonts aportin el 74% de la demanda elèctrica.

El desenvolupament a gran escala de les energies renovables ha suposat una reducció dels costos relatius d'aquestes, a més, per a l'any 2030 les multes per tona de CO₂ emesa serà de 35€. En conseqüència, per a l'any 2030 es vol instal·lar una potència total de 157GW reduint la potència instal·lada d'energies procedent de combustibles fòssils i augmentant la potència d'energies renovables.

En la Taula 5 es pot observar com evolucionarà la potència instal·lada de les energies principals. Cal destacar la reducció del 87% (considerada com la versió 1) o del 100% (considerada la versió 2) de l'energia procedent del carbó i l'augment de més del 100% de l'energia solar fotovoltaica. Per altra banda, queda pales que la potència instal·lada augmenta un 58%.

ENERGIA	POTÈNCIA INSTAL·LADA MW (2017)	POTÈNCIA INSTAL·LADA MW (2030)
HIDRÀULICA	17032	17537
NUCLEAR	7117	3181
CARBÓ	10004	0-1300
CICLE COMBINAT	26670	27146
EÒLICA	23132	50258
SOLAR FOTOVOLTAÏCA	4687	36882
SOLAR TÈRMICA	2304	7303
COGENERACIÓ	5828	3230
TOTAL	96774	145537-146837

Taula 5: Evolució de l'energia instal·lada des de l'any 2017 fins l'any 2030 [6]

Tenint en compte els factor de càrrega de l'any 2017, en la Taula 6 es pot observar com la generació d'electricitat augmentaria per a l'any 2030.

ENERGIA	INCREMENT GENERACIÓ ELÈCTRICA V1 EN GWH (2030)	INCREMENT GENERACIÓ ELÈCTRICA V2 EN GWH (2030)
HIDRÀULICA	544,1	544,1
NUCLEAR	-30755,6	-30755,6
CARBÓ	-39343,4	-45219,7
CICLE COMBINAT	662,9	662,9
EÒLICA	56079,2	56079,2
SOLAR FOTOVOLTÀICA	57533,7	57533,7
SOLAR TÈRMICA	11604,7	11604,7
COGENERACIÓ	-12562,7	-12562,7
TOTAL	43763	37886,9

Taula 6: Increment de la generació elèctrica entre l'any 2017 i l'any 2030.

La versió 1 (V1) és tenint en compte que la generació d'energia elèctrica a partir del carbó no desapareix, sinó que aquesta encara aporta una petita part al mix elèctric. La segona versió (V2) és tenint en compte la desaparició total de la producció elèctrica amb el carbó.

Roman palesat que l'increment de generació elèctrica és positiu degut a una previsió de l'augment de la demanda elèctrica. També, si es té en compte l'augment de població per a l'any 2030 [16], es pot observar com la relació entre energia produïda i població augmentarà de 4,56MWh/habitant a 5,47MWh/habitant en la versió 1 o 5,36MWh/habitant en la versió 2. El que converteix el nou sistema en una alternativa capaç de generar l'electricitat necessària.

Com a nota curiosa, cal destacar que, òbviament, en la versió 2 l'energia per a cada habitant és inferior a la versió 1 degut a la desaparició de l'electricitat provinent del carbó. Si es volgués generar tota l'electricitat amb energia renovable aquest factor seria de 3,82MWh/habitant, sent inferior a l'actual. El que suposaria que per a que aquest escenari fos possible, la demanda hauria de reduir-se.

A part de reduir les emissions de CO₂, el que es busca amb aquest nou model elèctric és

reduir la dependència de l'estat espanyol amb la resta de països pel que fa als recursos naturals i també diversificar el mix elèctric, és a dir, millorar la seguretat energètica.

Un altre aspecte clau del document és que també s'hi recull la promoció de l'autoconsum elèctric. Des de la derogació de l'impost al Sol que no permetia l'ús compartit d'una mateixa instal·lació elèctrica particular, els veïns d'un mateix bloc de pisos poden auto-consumir la seva pròpia energia elèctrica generada. Aquest fet, ajuda a reduir la dependència d'Espanya respecte d'altres països i a reduir la demanda d'energia a la xarxa.

Ara bé, com ja s'ha comentat anteriorment, aquest model energètic alternatiu no té en compte altres aspectes com són l'impacte mediambiental que poden provocar les fonts energètiques, la seva equitat i, sobretot, la taxa de retorn energètic.

Espanya no és un cas aïllat en el món, com ja s'ha comentat anteriorment, la política energètica espanyola ve donada per la Unió Europea i, per tant, Espanya forma part d'un context mundial on la gran majoria de països estan modificant el seu mix elèctric per adaptar-se als nous temps.

A continuació es presentarà aquests termes i es farà una anàlisi dels dos models energètics.

6. Impacte mediambiental

L'impacte mediambiental és l'efecte que produeix l'activitat humana sobre el medi ambient.

Tenint en ment aquesta definició, és fàcil pensar que totes les energies, per verdes que siguin, tenen un impacte sobre el medi que el modifica.

Per tal d'avaluar l'impacte que produirà una font energètica sobre el medi ambient el millor procediment és realitzar un anàlisi de cicle de vida, d'aquesta manera es tindran en compte tots els impactes realitzats des de l'inici fins la fi de la instal·lació.

Cal distingir entre diferents impactes, locals i globals. Entre els locals es poden diferenciar en esgotament dels recursos, emissions a la atmosfera, contaminació d'aigua i terra, generació de residus, contaminació per metalls pesants, radiació ionitzada, utilització del sòl, generació de soroll i impacte visual. Per altra banda, els globals es separen en canvi climàtic, disminució del gruix de la capa d'ozó, acidificació i disminució de la biodiversitat [10].

És necessari remarcar que alguns impactes són fàcilment avaluable com per exemple les emissions contaminants, la radiació, entre d'altres. Però n'hi ha d'altres impactes difícilment ponderables com és l'impacte visual.

A continuació es parlarà sobre les fonts energètiques principals i quin són el seu impacte mediambiental.

6.1. Energia hidràulica

Els grans envasaments necessaris per a produir electricitat a partir d'energia hidràulica suposen un gran impacte visual i a la biodiversitat (afectant directament la fauna de la zona o pertorbant la qualitat de l'aigua), la gran majoria produïts durant la fase de construcció.

La construcció d'una presa produeix una alteració del règim natural de caudals que té un efecte a mig i llarg termini sobre les poblacions piscícoles i sobre la flora del riu. Aquest fet s'intenta solucionar amb reixes per evitar l'entrada de peixos a la turbina o mitjançant escales per a que aquests puguin remuntar el riu.

Pel que fa a altres impactes, l'energia hidràulica no genera residus directes de la producció de l'electricitat, tampoc genera radiació i la contaminació per metalls pesants és molt petita en comparació a altres tecnologies. Aquesta contaminació és deguda a la oxidació que provoca l'aigua en la central hidroelèctrica, que fa que els metalls es descomponguin en

l'aigua com el ferro, manganès o, fins i tot, mercuri.

Per tot això, es considera que és una energia amb poc impacte ambiental.

6.2. Energia fotovoltaica

L'energia solar fotovoltaica és considerada com l'energia renovable que més impacte ambiental provoca, sobretot degut a les operacions extractives de les matèries primes i el procés industrial de cel·les fotovoltaïques [15].

De la mateixa manera que l'energia hidràulica, l'energia solar fotovoltaica també pot generar un impacte visual negatiu degut a la gran ocupació de terreny que aquest tipus d'instal·lacions suposen.

Per altra banda, la producció de plaques solars genera una important acidificació del medi ambient, no directament, sinó en el tractament de purificació dels materials semiconductors. També és bastant alta l'aportació de residus de metalls pesants, alguns de manera indirecte i altres de manera directe, com és l'arseni utilitzat en alguns tipus de panells solars. Aquests metalls no tan sols són nocius per al medi ambient sinó que també ho són per a la salut de l'ésser humà.

6.3. Energia Eòlica

Un dels arguments que s'han utilitzat més en contra de l'energia eòlica és el seu impacte ambiental envers la seva ocupació del territori, ja que els parcs eòlics es col·loquen en zones de vent habitual i condicionen el moviment dels vertebrats voladors. Ara bé, sobre això cal comentar que gran part de l'impacte es produeix durant la fase de construcció ja que es produeixen la major part dels desplaçaments dels animals [15].

Pel que fa a l'impacte visual que aquest produeix, cal comentar que les instal·lacions eòliques són les que menys terreny ocupen i que, un cop la explotació ja no és útil, els aerogeneradors es poden retirar i restablir les condicions inicials de la zona.

Respecte a l'impacte sonor, la reglamentació exigeix que, a una distància de 200 metres, el nivell de soroll no superi els 48dB.

L'energia eòlica és una de les energies amb menys impacte, ara bé, igual que la resta de casos, un parc eòlic necessita d'unes instal·lacions per tal de que el recurs sigui explotat correctament i, per tant, hi ha altres impactes que s'han d'analitzar. Cal destacar, però, que la major part de l'impacte mediambiental negatiu és genera durant la construcció i

explotació.

Un dels impactes més nocius de l'energia eòlica és l'ús de materials pesants com el coure [25].

Per altra banda, degut a que usa l'energia del vent per a produir energia, l'impacte ambiental relacionat amb la generació de residus o l'esgotament de recursos energètics és molt baix, igual que amb l'energia solar i l'energia hidràulica.

6.4. Energia nuclear

L'energia nuclear es troba entre les que produeixen un major impacte negatiu al medi ambient. Aquest fet no és degut a que participi en l'escalfament global, a la disminució de la capa d'ozó ni a l'acidificació, però sí que ho fa en l'ús de metalls pesants, els residus radioactius generats i l'esgotament de recursos energètics.

El combustible utilitzat per a la producció d'electricitat en les centrals nuclears és l'urani, un metall pesant. A partir d'aquest es produeixen residus altament radioactius que poden provocar un gran impacte mediambiental negatiu.

6.5. Energia del carbó

L'energia elèctrica provinent del carbó és la que aporta un impacte ambiental més negatiu entre les energies que s'han comentat en aquest apartat.

Contribueix de manera negativa en l'escalfament global i en l'acidificació. A més, la crema de carbó augmenta l'aparició de metalls pesants nocius per a l'ésser humà i el medi ambient i també genera un alt contingut de residus procedents.

Per altra banda, l'esgotament dels recursos energètics suposa un altre impacte mediambiental negatiu d'aquesta energia.

6.6. Energia del gas natural

Per últim, l'energia elèctrica procedent del gas natural és la més respectuosa amb el medi ambient de les energies convencionals.

L'impacte negatiu d'aquesta tecnologia prové en la major part de les emissions de CO₂ que aquesta provoca. Així mateix, també contribueix negativament en l'acidificació i en

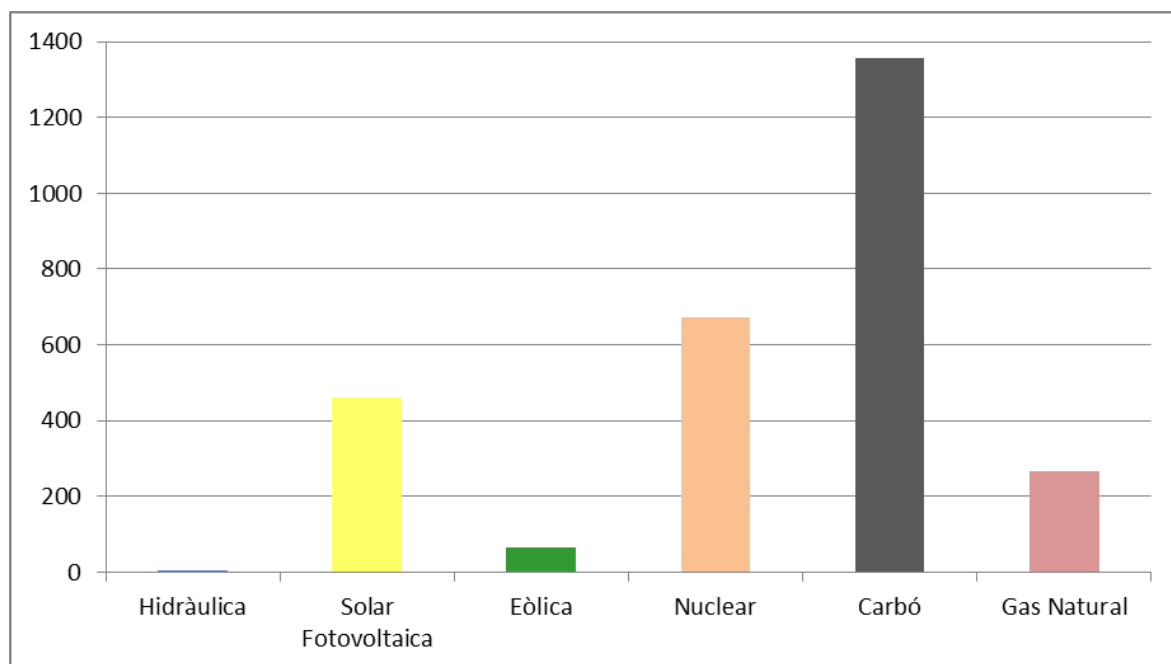
l'aportació de metalls pesants a la natura, com és un exemple el mercuri [26].

6.7. Ecopunts

Els Ecopunts és una mesura utilitzada per a mesurar l'impacte negatiu de les tecnologies sobre el medi ambient. A partir d'un anàlisi de cycle de vida es fa una ponderació sobre els impactes ambientals en diferents categories i el resultat total és la suma d'aquestes ponderacions.

Els Ecopunts avaluen l'impacte ambiental de les fonts energètiques en els següents aspectes; escalfament global, gruix de la capa d'ozó, acidificació, eutrofització, boira fotoquímica, metalls pesats, substàncies cancerígenes, radiacions ionitzants, generació de residus, residus radioactius i esgotament de recursos energètics. Així doncs, aquesta metodologia no té en compte aspectes com l'impacte visual o auditiu d'una font energètica.

És important remarcar que els Ecopunts són unitats de penalització ambiental per Terajoule d'electricitat produïda, és a dir, que quants més Ecopunts una tecnologia obtingui major serà el seu impacte mediambiental negatiu.



Taula 7: Resum dels Ecopunts de les fonts energètiques principals [15]

Com ja s'ha comentat durant l'apartat, l'energia hidràulica és l'energia més ben considerada des del punt de vista d'impacte ambiental, mentre que l'electricitat procedent del carbó és, de llarg, la que suposa un impacte més negatiu.

A destacar de la taula de sobre és el fet que l'energia solar fotovoltaica té un impacte sobre el medi ambient més negatiu que el gas natural.

6.8. Externalització de l'impacte ambiental

L'externalització de l'impacte ambiental és l'acció de produir un impacte ambiental fora de la zona de control del beneficiari de l'ús de la tecnologia. Per exemple, el 4 de juny de 2019 es va saber que Espanya va comprar a Marroc energia elèctrica provinent de centrals tèrmiques de carbó [12]. És a dir, Espanya està tancant centrals tèrmiques per a complir amb les legislacions provinents d'Europa, però, per altra banda, compra energia barata provinent del carbó a altres països. Per tant, el resultat final és que l'impacte mediambiental, en aquest cas en forma d'emissions de CO₂, que s'hauria de produir dins d'Espanya, es produeix al Marroc.

Evidentment, aquest fet és un contrasentit de la evolució que es pretén amb el model elèctric alternatiu.

Al Món hi ha molts intercanvis internacionals d'electricitat. Espanya intercanvia electricitat amb els seus països veïns: França, Portugal, Andorra i Marroc. Durant l'any 2017 la situació va ser la que mostra la Figura 14:

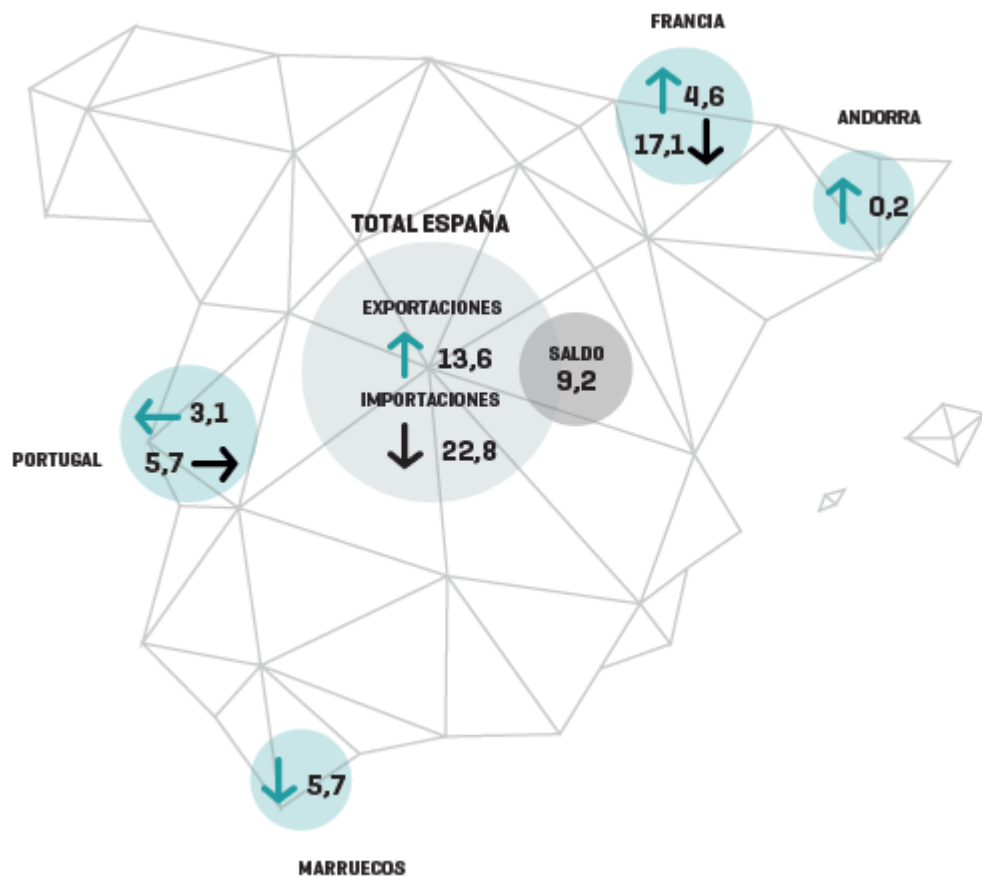


Figura 14: Intercanvis internacionals d'electricitat durant l'any 2017 [17]

Cada país té el seu mix elèctric i, per tant, cal tenir en compte quina és la procedència de l'electricitat que es compra per tal de no produir una externalització de l'impacte mediambiental.

És important vigilar aquesta pràctica perquè els països que la segueixen surten beneficiats sempre i quan no hi hagi un sistema de multes. En el cas comentat, Espanya surt beneficiada degut a que ha externalitzat l'emissió de CO₂, mentre que el Marroc augmenta el seu PIB amb la venda d'electricitat i disminueix la seva intensitat energètica.

7. Equitat de les energies

S'entén com a equitat energètica a l'accessibilitat i cost de proporcionar energia a la societat. Conseqüentment, es coneix com a pobresa energètica la falta d'equitat energètica.

Cada cop és més nombrosa la població que reclama que l'energia hauria de ser un dret bàsic dels éssers humans. Com es comentarà més endavant, l'ús de l'energia està estretament relacionat amb el desenvolupament humà.

En la actualitat, tal i com comentava Ivan Illich [11] es poden trobar dos tipus de països:

- Sub-equipats, és a dir, aquelles regions que no disposen de les infraestructures necessàries per a l'ús de l'energia.
- Sobre-industrialitzats, aquells estats en els quals la vida social està dominada per la indústria.

Tot i que Illich classifica els països en dos tipus, és possible trobar en un mateix país les característiques d'ambdues categories. La crisi econòmica i l'augment dels preus de l'energia han fet augmentar la pobresa energètica a Espanya.

Així doncs, un model elèctric alternatiu hauria de poder garantir una millor equitat, un millor accés a l'energia. En aquest apartat es valorarà cada energia segons aquesta característica.

7.1. Característiques principals

Per tal d'establir un model elèctric equitatiu, les fonts energètiques utilitzades han de complir una sèrie de característiques.

El primer d'aquests aspectes és la tecnologia. Evidentment una font energètica amb una tecnologia molt avançada no és assequible per països en desenvolupament o del tercer mon. També la política hi juga un paper molt important en les fonts energètiques amb un gran desenvolupament tecnològic.

Una altra característica és el cost. Molt relacionat amb l'anterior, ja que normalment una tecnologia molt innovadora comporta uns costos d'inversió molt elevats. De la mateixa manera que l'anterior, una font energètica molt costosa no serà viable per a països no desenvolupats.

Per últim, la escalabilitat o modularitat, és a dir, la capacitat d'una font energètica de poder-se adaptar a les necessitats dels usuaris.

Totes aquestes característiques van encaminades a la accessibilitat, és a dir, a la capacitat que té una persona per accedir a aquesta energia.

Un cop explicades les característiques, quines són aquelles energies més equitatives?

7.2. Anàlisi de les principals fonts energètiques

De la mateixa manera que en anteriors apartats, les energies analitzades seran les sis fonts principals més utilitzades; solar fotovoltaica, hidràulica, eòlica, carbó, nuclear i gas natural.

Tanmateix, abans de començar amb l'anàlisi, cal recordar que les energies de caràcter renovable depenen molt del clima on es trobin, per tant, queda clar que l'energia hidràulica no serà una energia accessible per a les poblacions del desert de Sàhara o l'energia solar no ho serà a Alaska.

7.2.1. Energia hidràulica

L'energia hidràulica és una de les tecnologies més antigues i, per tant, no és necessari un gran desenvolupament per a poder generar energia elèctrica a partir d'aquest tipus de fonts. Així doncs, pel que fa al cost, no és necessari una inversió inicial important, en comparació amb altres energies renovables, per tal de generar electricitat a partir d'aquesta font.

La accessibilitat a l'energia hidràulica recau en aquelles zones amb una pluviometria elevada, zones amb rius, llacs o mars, on es pugui transformar l'energia cinètica o potencial del cabal de l'aigua en energia elèctrica.

Per últim, pel que fa a la modularitat, l'energia hidràulica és una energia bastant adaptable a les necessitats dels consumidors. Existeixen les centrals mini-hidràuliques amb una potència inferior a 10MW fins a 20000MW d'una central convencional.

7.2.2. Energia solar fotovoltaica

L'energia solar és una tecnologia relativament nova, però accessible a nivell econòmic i tecnològic, conseqüència de la seva gran modularitat.

De fet, les centrals solars fotovoltaiques estan construïdes a partir de mòduls solars units en sèrie i paral·lel per arribar a la potència desitjada.

Per altra banda, com s'ha comentat a l'inici d'aquest apartat, aquesta tecnologia serà útil en zones amb gran radiació solar.

7.2.3. Energia eòlica

De manera semblant a l'energia solar fotovoltaica, l'energia eòlica és una font accessible gràcies a la seva modularitat, que la converteix en una tecnologia abastable, de cost reduït i escalable a les necessitats de la zona.

La unitat mínima d'un parc eòlic és l'aerogenerador, el qual pot variar la seva potència nominal en funció de la seva alçada i longitud de les pales, de 50W per a ús personal fins a desenes de mega-watts.

7.2.4. Energia nuclear

L'energia nuclear és, de les fonts energètiques citades i per citar, la més complicada tecnològicament i una de les que requereixen una inversió econòmica més important.

Gran part d'Àfrica i Àsia no disposen del desenvolupament suficient per a poder instal·lar aquest tipus de central. A més, en altres zones no és un problema tecnològic o econòmic sinó que és polític.

Pel que fa a la modularitat, les centrals nuclears no poden adaptar-se de la mateixa manera a com ho fan les energies renovables. Si bé és cert que existeixen projectes per a construir centrals nuclears més compactes, com per exemple el CAREM a Argentina, capaç de donar 25MW de potència, ara bé, aquesta tecnologia està molt lluny de poder utilitzar-se per a petits poblats o individualment.

7.2.5. Energia del carbó

L'energia tèrmica procedent del carbó és de les tecnologies més antigues i, per tant, més accessible per a tots els països des d'aquest punt de vista.

Pel que fa als costos, la inversió inicial depèn de la política del país. En països que restringeixen les emissions de CO₂, la inversió és més gran que en els països on no es fa.

Per últim, la modularitat és un dels aspectes dèbils d'aquesta tecnologia. És cert que es poden trobar centrals tèrmiques de potència molt variada. Per exemple, a Espanya es poden trobar centrals de desenes de mega-watts fins a milers de mega-watts. Ara bé, no és possible arribar a la capacitat de modularitat de les energies renovables.

7.2.6. Energia del gas natural

L'energia elèctrica produïda a partir del gas natural és un cas molt similar al del carbó.

Es tracta d'una energia barata pel que fa a la inversió inicial i una tecnologia assequible per a molt països, però de modularitat reduïda.

8. EROI

EROI (Energy Return of Investment) o, en català, taxa de retorn energètic, és un factor que es defineix com l'energia que proporciona una font al llarg de la seva vida dividit entre l'energia invertida en aquesta font. És a dir, si per a produir una placa solar s'ha invertit 1MJ i, al llarg de la seva vida, aquesta placa ofereix 2MJ, la taxa de retorn energètic serà de 2.

$$EROI = \frac{\text{Energia proporcionada per la font}}{\text{Energia invertida en la font}}$$

Equació 3: EROI

Charles A.S. Hall i Kent A. Klitgaard [7] defineixen aquest factor com un element molt important per al desenvolupament humà. Es suposa el cas en que un humà caçador consumeix 100J per a caçar un cérvol i l'energia que aquest li proporciona és equivalent a 200J. Es podria dir que l'humà caçador té un excés d'energia que pot dedicar a altres tasques. Però que passaria si l'energia proporcionada pel cérvol equival a 100J? O fins i tot a 50J?

Queda clar amb aquest exemple que, per al correcte esdevenir de la societat, és necessari un EROI com a mínim més gran que 1.

En aquest capítol es definirà que és i com calcular l'EROI, quin és el valor mínim per a un desenvolupament correcte de la societat, es farà un recull i una comparació dels diferents valors obtinguts per experts en la matèria i es calcularà un EROI per als dos models energètics.

8.1. EROI i el desenvolupament humà

La importància d'aquest valor recau en la seva relació amb el desenvolupament humà i, en conseqüència, de les societats.

Els humans necessiten grans quantitats d'energia per a sobreviure i reproduir-se. Per a tots els organismes, aquesta energia és la resultant després d'extreure tota l'energia invertida en ella.

La facilitat d'obtenir energia i la millora de la eficàcia a com s'utilitza a permès als humans millorar la comoditat, viure més i augmentar la població. De fet, existeix una forta relació entre l'energia utilitzada per càpita i l'índex de desenvolupament humà. És necessari tenir

en compte que l'energia està darrere de qualsevol producció de béns o serveis.

Tornant a l'exemple de l'humà caçador, si aquest humà a part de caçar vol dedicar el temps a realitzar altres coses (oci, família, estudiar, entre d'altres) roman palès que l'energia és vital per al desenvolupament. A més, també es pot intuir que, per a un correcte creixement, serà necessari un valor d'EROI més gran que la unitat.

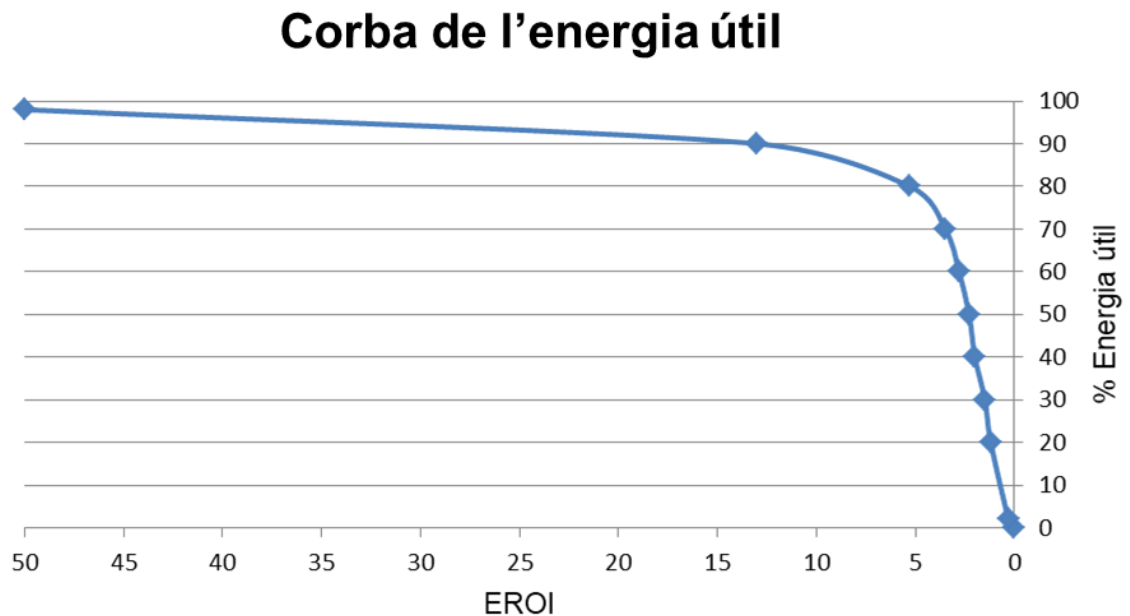


Figura 15: Corba de l'energia útil [7]

En la Figura 15 es pot observar la corba de l'energia útil que avalua l'EROI d'una font energètica en funció del tant per cent d'energia útil que s'extreu d'aquesta. L'àrea sota la corba és l'energia retornada a la societat i la superfície sobre la corba és l'energia utilitzada.

A mesura que l'EROI és més gran, clarament l'energia retornada a la societat és més gran. Per contra, a mesura que l'EROI és més petit l'energia retornada tendeix a zero.

Ara bé, quin és l'EROI mínim necessari per a que una font energètica sigui útil per a la societat?

En la Figura 16 es pot observar com cada part de la piràmide pertany a una necessitat, en la base s'hi troben les necessitats més bàsiques i com més a munt menys vitals són per a l'ésser humà. A part d'això, s'hi poden diferenciar dos colors. El color blau representa aquelles necessitats on l'EROI té un valor calculat i el color groc representa aquelles necessitats en que el valor de l'EROI està especulat.

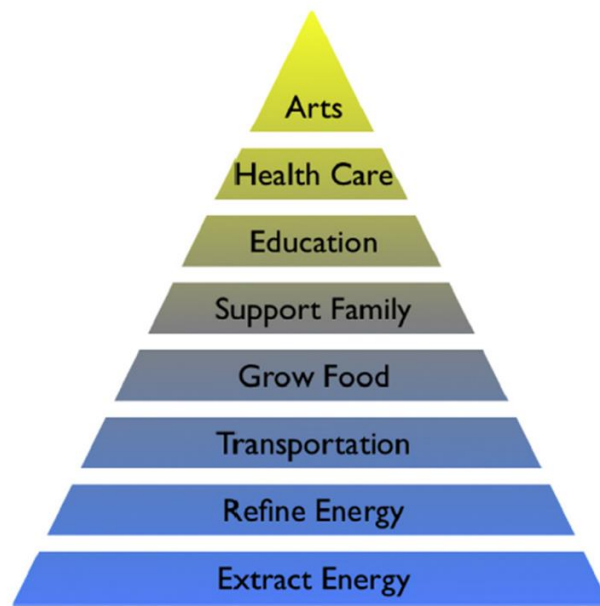


Figura 16: Piràmide de les necessitats energètiques [18]

Així doncs, tal i com està definit l'EROI per a fonts energètiques, el seu valor és 1 a partir del transport. Per a produir alimentació és necessari un EROI de 5. Un valor de 7 per a dedicar a les famílies. Entre 9 i 10 per a poder educar. 12 per a la sanitat i 14 per a l'art.

Per tant, hi ha experts en el tema que consideren que per al correcte desenvolupament d'una societat és necessari obtenir un valor d'EROI més gran o igual a 7. Per altra banda, alguns altres experts consideren que és necessari un EROI de 14 com a mínim [7].

8.2. Com definir i calcular l'EROI

Per tal de calcular correctament l'EROI és necessari definir-lo bé, això vol dir explicar quins tipus d'EROI hi ha i com s'interpreten cadascun.

Per tal de calcular l'EROI és molt necessari definir els límits del càlcul. Depenent d'això es poden considerar fins a quatre versions diferents de l'EROI [8]:

- EROI estàndard: En aquest càlcul es considera l'energia tant directe com indirecte utilitzada per a generar la sortida, però no té en compte l'energia associada al treball, suport financer, entre d'altres. Aquest càlcul d'EROI s'aplica per a calcular el valor en el seu punt d'explotació.
- EROI del punt d'ús: Aquest càlcul és més intuïtiu i considera tant l'energia de refinament com la de transport.

- EROI extens: En aquest cas es té en compte l'energia des del punt d'extracció fins que és útil per a la societat.
- EROI de la societat: Per a interpretar aquest EROI cal calcular tota l'energia invertida i tota la obtinguda per totes les fonts energètiques d'una societat.

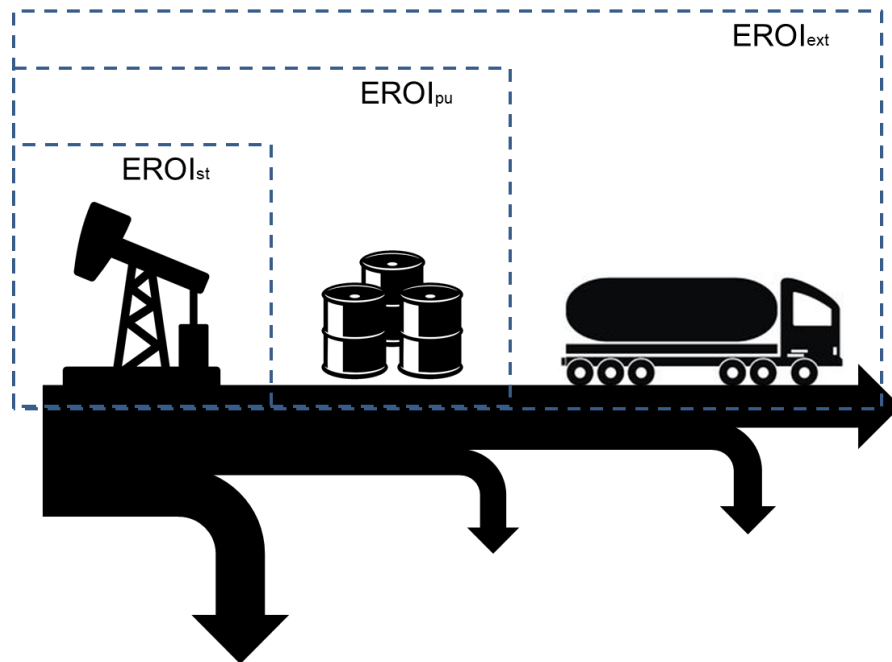


Figura 17: Representació gràfica de tres càlculs d'EROI [8]

Roman palesat que el càlcul més interessant de fer és l'EROI extens o de la societat ja que permet realitzar un estudi molt més detallat i interessant sobre si una energia és viable energèticament o no ho és.

Tot i tenir en compte això, per tal de calcular l'EROI cal parlar també de la profunditat del càlcul, és a dir, si tenim els costos directes invertits en la font energètica (materials, transports, personal...) o també es tenen en compte les energies invertides indirectament (màquines per a fer màquines). Aquest fet es pot observar en la Figura 18.

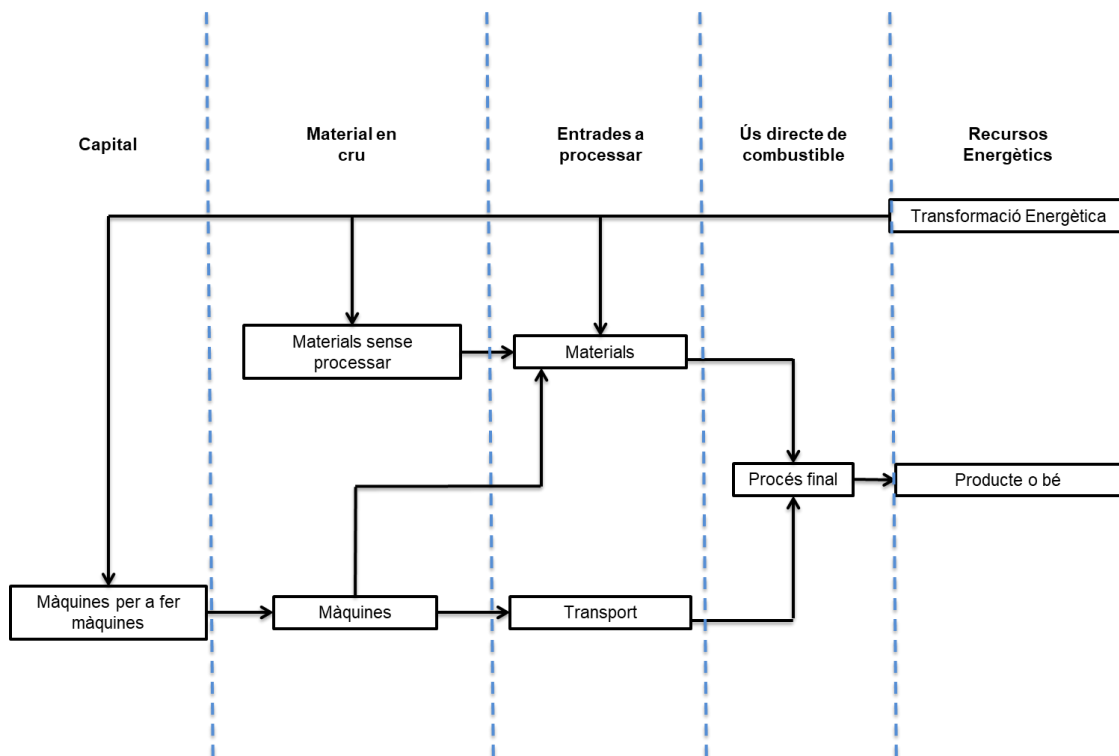


Figura 18: Nivells de costos energètics [9]

Com més profund sigui el càlcul més complet serà l'anàlisi.

Amb tot això, es pot deduir que el càlcul de l'EROI requereix d'una metodologia rigorosa per tal d'establir els límits dels aspectes a considerar i que, a més, és un càlcul complicat de realitzar degut a la complexitat de les dades. Per tant, existeixen varies aproximacions que es poden realitzar.

8.2.1. Càlcul literal

El primer càlcul a tenir en compte és el càlcul literal. Aquest cas no es tracta d'una aproximació sinó que seria el càlcul real de l'EROI.

La dificultat d'aquest tipus de càlcul rau en la dificultat per obtenir les dades d'energia invertida. Per exemple, és difícil trobar l'energia necessària per a realitzar una turbina d'una central hidràulica.

8.2.2. Càlcul a partir de la intensitat energètica

Una altra metodologia per a calcular l'EROI seria a partir de la intensitat energètica.

La intensitat energètica és un valor que relaciona l'energia consumida per un país amb el

PIB d'aquest mateix país, així doncs és un indicador de la eficiència energètica. Un valor baix d'intensitat energètica és positiu, indica que s'ha consumit poca energia per a produir un elevat PIB.

$$I = \frac{\text{Consum energètic (E)}}{\text{PIB}}$$

Equació 4: Intensitat energètica

Aquest valor s'interpreta com que es necessiten x unitats d'energia per a generar 1 unitat de diners. Per tant, com més baix és aquest valor, millor.

A partir d'aquest valor, per a calcular l'EROI, es necessitaria dividir l'energia obtinguda a partir d'una font entre el valor econòmic invertit en aquesta font energètica i multiplicar-lo per la intensitat energètica, és a dir:

$$EROI = \frac{\text{Energia obtinguda}}{\text{Cost invertit} \cdot I}$$

Equació 5: Càlcul d'EROI a partir del cost invertit i la intensitat energètica

És molt més senzill obtenir els costos monetaris invertits en una font energètica que els costos d'energia, per tant, és un càlcul molt més senzill de realitzar. Per altra banda, no és tant precís com el càlcul literal.

8.2.3. Càlcul de Murphy

Aquest càlcul es basa en la metodologia que utilitza Murphy per a trobar el valor d'EROI [9].

En aquest cas, s'utilitza també la intensitat energètica però de la següent manera:

- Multiplicada per 1,7 per béns relacionats amb la manufactura i la enginyeria.
- Dividida entre tres per als costos de negocis i finances.
- Multiplicada per 1 en altres casos.

Els valors expressats a dalt, a partir d'ara, es coneixeran com els factors de Murphy.

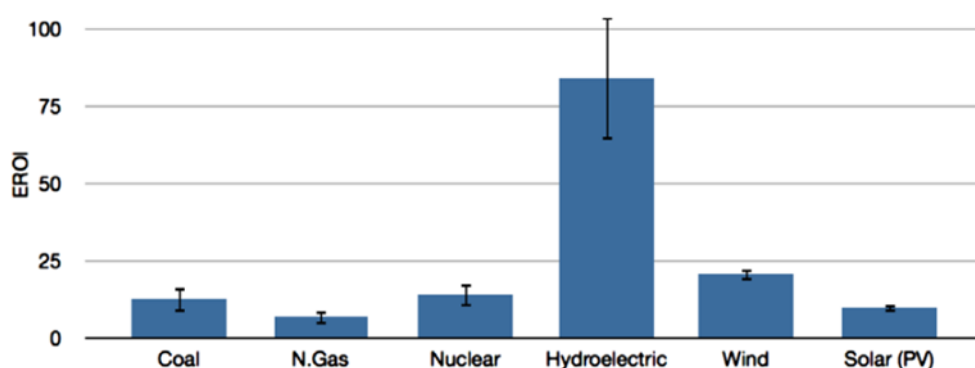
8.3. EROI de fonts energètiques

Un cop explicat què és l'EROI, com es calcula i quins tipus hi ha, en aquest apartat es parlarà sobre quina taxa de retorn energètic tenen les fonts energètiques principals (carbó, gas natural, nuclear, hidroelèctrica, eòlica i solar fotovoltaica).

Com ja s'ha comentat anteriorment, el valor de l'EROI pot ser molt diferent en funció dels aspectes considerats. No només pel que fa a les energies indirectes o directes o al tipus d'EROI, sinó que també al país. Per exemple, la taxa de retorn energètica de l'energia solar fotovoltaica no serà la mateixa per a Xina que per a Espanya.

Tot i això, en aquest apartat es farà un recull dels diferents valors sense considerar els aspectes citats i s'utilitzarà uns valors definits per tal d'arribar a unes conclusions.

En la Taula 9 es pot observar un resum de l'EROI de diferents fonts energètiques. Cada energia conté la mitjana i la desviació estàndard. Cal recordar que aquests valors són mundials i depenen de cada autor i tipus de càlcul.



Taula 8: Resum dels valors d'EROI de les Font energètiques més importants [8]

Començant per l'energia elèctrica procedent del carbó, internacionalment aquesta font té una mitjana de 10. És interessant comentar que als EUA el valor d'EROI d'aquesta font entre els anys 1950 i 1980 va baixar de 80 a 30 degut a que cada cop era més costós extreure el carbó.

Respecte al gas natural, cal mencionar que és el valor més baix de les energies que es comentaran. L'EROI d'aquesta font energètica és de 7.

Per altra banda, l'EROI de l'energia hidroelèctrica és el més alt de tots i amb diferència,

amb una mitjana de 84. Encara que també cal observar en la Taula 9 com el seu valor és el que més varia en funció del autor.

L'energia nuclear és una font que aporta una quantitat d'energia molt gran pel que fa a la quantitat de combustible que necessita. Ara bé, pel que fa a la inversió energètica general, aquest tipus d'energia requereix d'una inversió molt elevada i finalment el seu valor d'EROI és de 14.

Tornant a les energies renovables, el segon valor més alt és el de l'energia elèctrica procedent del vent. En aquest cas el valor és de 20.

Per últim, l'energia solar fotovoltaica és dels valors més baixos amb un EROI proper a 10.

8.4. EROI de la societat a Espanya

Tal i com ja s'ha comentat anteriorment és molt complicat, sinó impossible, calcular l'EROI de la societat. Igualment, en aquest apartat es realitzarà un breu estudi de comparació per establir si l'EROI de la societat a Espanya millora o empitjora amb el nou model elèctric.

ENERGIA	EROI
CARBÓ	10
GAS NATURAL	7
NUCLEAR	14
HIDROELÈCTRICA	84
EÒLICA	20
SOLAR FOTOVOLTAICA	10

Taula 9: Taula resum dels EROIs de les principals fonts energètiques [8]

En l'apartat 6 es parlava sobre el nou Pla Nacional Integrat d'Energia i Clima i com aquest pretenia recollir el canvi de model elèctric. Aquest canvi passa per substituir part o tota la potència instal·lada del carbó i part de la potència instal·lada de l'energia nuclear per energies més netes i, a més, per cobrir l'augment de la demanda amb energia renovable. Concretament, el canvi consisteix en substituir entre el 87% i el 100% de l'energia elèctrica procedent del carbó i el 55% de l'energia elèctrica nuclear per energia eòlica i energia solar fotovoltaica.

Per tant, s'està substituint dues tecnologies amb EROIs de 10 i 14 per energia eòlica, amb un EROI de 20, i energia solar fotovoltaica, amb un EROI de 10.

Si com en l'apartat 6 es té en compte el factor de càrrega que hi va haver el 2017, la generació d'electricitat per part de les centrals nuclears i de carbó es redueix en un 14% i entre un 18% a 21% respectivament. Però, aquesta baixada es veu compensada per l'augment del 27% i 30% de la generació d'electricitat aportada per les plantes eòliques i solars fotovoltaïques respectivament.

Així doncs, si es pondera un EROI entre les fonts energètiques que canvien per tal de poder comparar l'EROI de societat entre el model elèctric present i el del futur, es pot trobar com l'EROI de les energies substituïdes és menor que l'EROI de les fonts energètiques que reemplacen les anteriors. Per tant, des del punt de vista de l'EROI sembla un bon canvi.

Ara bé, aquest càlcul no deixa de ser una aproximació que no té en compte diversos factors, com per exemple, que els EROIs tinguts en compte no són específics d'Espanya o que s'ha suposat un factor de càrrega constant. Així que no es pot concloure amb certesa si aquest canvi suposa una millora o, si per contra, es tracta d'un empitjorament de la situació energètica d'Espanya.

8.5. Crítica al EROI i nova proposta

El valor d'EROI comentat anteriorment no deixa de ser un valor potencial calculat a partir de supòsits. Per tal de calcular, tant el numerador com el denominador, cal suposar l'energia que es generarà amb la font i cal suposar uns costos energètics que es tindran en el futur i que no s'han realitzat en el moment de la instal·lació. Aquest fet, pot dur a errors greus en el càlcul que es poden derivar de:

- El temps de vida de les centrals. Per a estimar una generació d'electricitat s'ha de suposar una vida útil, però que passaria si la vida de la central es prorrogués? O per contra es tanqués abans d'hora? Un cas podrien ser les centrals nuclears que tenen una vida estimada de 40 anys, però que a EEUU s'està prorrogant la seva vida útil a 60 anys. Això suposaria un augment de la generació elèctrica i un augment relacionat amb els costos energètics d'ús.
- El clima. Com ja s'ha comentat, la producció elèctrica depèn molt del clima. En anys de molta radiació solar, la producció d'energia solar fotovoltaica serà molt alta, però no ho serà la de l'energia hidràulica.
- La sobreexplotació d'una font energètica. En el cas de que hi hagi una potència

instal·lada excessiva d'alguna font energètica, aquesta no podria generar tota l'energia que se li suposa. Per exemple, en una tecnologia de punta com seria l'energia hidràulica, si s'instal·lessin moltes plantes, aquestes deixarien de produir l'electricitat que se'ls hi suposa.

De manera anàloga, això també ocorre en la economia, on amb el càlcul de la taxa interna de retorn o el valor actual net s'han de fer uns supòsits de costs i guanys futurs que possiblement no siguin reals. Així doncs, per a calcular un EROI real és necessari tenir en compte les energies invertides i generades cada any.

Per tant, a partir d'ara es coneixerà com a EROI potencial el valor calculat prèviament suposant valors de generació i inversió energètics, i com a EROI real el valor calculat amb dades actualitzades.

9. Programa

Cal recordar que aquest treball forma part d'un programa en desenvolupament que valorarà sistemes energètics a partir de diferents paràmetres i que el programa desenvolupat en aquest treball és una part del projecte total.

Ara bé, la part desenvolupada en aquest projecte partirà de tres tipus diferents d'entrades:

- Els factors de càrrega presents. Necessaris per a calcular tant els costos energètics com la generació elèctrica.
- Els costos monetaris de les fonts energètiques. Per tal de transformar aquests valors a costos energètics.
- La intensitat energètica.

La sortida d'aquest programa serà un estudi energètic de les inversions i generacions realitzades.

Cal tenir en compte que, degut a la senzillesa del programa, s'ha decidit realitzar aquest amb el programa Excel.

9.1. Procediment

Per tal de calcular l'EROI el procediment a seguir és el següent.

En primer lloc, cal decidir quin serà el tipus de càlcul que es farà (literal, intensitat energètica o Murphy). Ja que és un mètode contrastat utilitzat en altres estudis i és el més senzill amb les dades existents, es decideix utilitzar el càlcul de Murphy. Com a exemple d'ús, es pot observar que Pedro Prieto i Charles Hall van replicar aquesta metodologia al seu llibre "Spain's photovoltaic revolution" [18].

Un cop conegut el mètode de càlcul, cal entendre quines són les dades d'entrada del programa (factors de càrrega i costos monetaris) i com es processaran.

Pel que fa als costos monetaris, cal tenir en compte que per al tipus de càlcul que s'ha decidit s'hauran de dividir en tres categories; costos de producció i enginyeria, costos de negoci i financers i altres costos. A més, els costos variables depenen de la generació produïda en la central, per tant serà interessant expressar la fórmula de l'EROI en funció del temps de producció de la font energètica.

Respecte al factor de càrrega, serà una entrada que dependrà de cada any i, per tant, és important expressar l'equació de l'EROI a partir d'aquesta variable.

Així doncs, és necessari re-formular l'expressió de l'EROI en funció del factor de càrrega i del temps de generació de la central.

A partir de les entrades i de les equivalències establertes en el càlcul de Murphy, el programa calcularà les energies invertides i l'electricitat generada per, després, calcular un valor d'EROI real, no potencial.

9.2. EROI real

Tenint en comptes el que s'ha comentat en l'apartat anterior, la taula de càlcul de l'EROI tindrà la següent forma:

ENERGIA	ANY 0	ANY 1	ANY N
INTENSITAT ENERGÈTICA			
POTÈNCIA INTSAL·LADA			
FACTOR DE CÀRREGA			
COSTOS PRODUCCIÓ I ENGINYERIA FIXOS			
COSTOS PRODUCCIÓ I ENGINYERIA VARIABLES			
COSTOS DE NEGOCI I FINANCES FIXOS			
COSTOS DE NEGOCI I FINANCES VARIABLES			
ALTRES COSTOS FIXOS			
ALTRES COSTOS VIARIABLES			

Taula 10: Taula per a càlcul de l'EROI real

A partir d'aquesta taula, del factor de càrrega i de la intensitat energètica es podrà fer un registre de les energies invertides i generades i, per tant, un càlcul de l'EROI real.

9.3. Formula

Queda palès que és necessari una expressió de la formula de l'EROI en funció del factor de càrrega i del temps de generació de les centrals, per tant, en aquest apartat es pretén desenvolupar aquesta formula.

$$EROI = \frac{\text{Energia generada}}{\text{Energia invertida}}$$

A partir de la equació general es desenvoluparà el numerador i el denominador per separat.

$$\text{Numerador} = E_{nuclear}^o + E_{carbó}^o + E_{gas\ natural}^o + E_{hidràulica}^o + E_{eòlica}^o + E_{fotovoltaica}^o =$$

Equació 6: Forma extensa del numerador de l'equació de l'EROI

Si es té en compte l'expressió del factor de càrrega:

$$\begin{aligned} &= P_{nuclear}^o \cdot FC_{nuclear} \cdot \frac{365 \cdot 24}{100} + P_{carbó}^o \cdot FC_{carbó} \cdot \frac{365 \cdot 24}{100} + P_{gas\ natural}^o \cdot FC_{gas\ natural} \cdot \frac{365 \cdot 24}{100} + P_{hidràulica}^o \cdot FC_{hidràulica} \cdot \frac{365 \cdot 24}{100} + P_{eòlica}^o \cdot FC_{eòlica} \cdot \frac{365 \cdot 24}{100} + P_{fotovoltaica}^o \cdot FC_{fotovoltaica} \cdot \frac{365 \cdot 24}{100} = \\ &= P_{nuclear}^o \cdot FC_{nuclear} \cdot 87,6 + P_{carbó}^o \cdot FC_{carbó} \cdot 87,6 + P_{gas\ natural}^o \cdot FC_{gas\ natural} \cdot 87,6 + P_{hidràulica}^o \cdot FC_{hidràulica} \cdot 87,6 + P_{eòlica}^o \cdot FC_{eòlica} \cdot 87,6 + P_{fotovoltaica}^o \cdot FC_{fotovoltaica} \cdot 87,6 = \end{aligned}$$

Equació 7: Desenvolupament del numerador de l'equació de l'EROI

Si es simplifica la equació de sobre, el numerador queda de la següent manera:

$$= 87,6 \cdot \sum_i^n P_i \cdot FC_i$$

Equació 8: Expressió reduïda del numerador de l'EROI

En les Equacions 8 fins la 14, la i es refereix a cada energia individual fins a n possibles energies.

Així doncs, el numerador queda expressat de manera molt reduïda i en funció dels factors

de càrrega. Ara és el torn del denominador:

$$\begin{aligned} \text{Denominador} &= E_{nuclear}^i + E_{carbó}^i + E_{gas\ natural}^i + E_{hidràulica}^i + E_{eòlica}^i + E_{fotovoltaica}^i = \\ &= \sum_i^n E_n^i = \end{aligned}$$

Equació 9: Desenvolupament del denominador de l'equació de l'EROI

Seguidament, es separa l'equació en energies variables i energies fixes.

$$= \sum_i^n E_{n\ fix}^i + \sum_i^n E_{n\ variable}^i =$$

Equació 10: Expressió dividida en energia fixa i variable

Mitjançant el càlcul de Murphy, que permet canviar de variables entre cost monetari i cost energètic, s'expressa l'equació com es pot veure a sota:

$$= \sum_i^n C_{n\ fix}^i \cdot f_M^i \cdot I_e + \sum_i^n C_{n\ variable}^i \cdot f_M^i \cdot I_e =$$

Equació 11: Expressió amb els coeficients de Murphy

Els costos variables depenen de les hores reals d'explotació de la central, per tant, es poden expressar els costos de manera unitària multiplicada per la quantitat d'hores.

$$= \sum_i^n C_{n\ fix}^i \cdot f_M^i \cdot I_e + \sum_i^n C_{n\ variable}^i \cdot h_{reals} \cdot f_M^i \cdot I_e =$$

Equació 12: Expressió amb el cost variable unitari

Finalment, tenint en compte la segona expressió del factor de càrrega, el denominador queda expressat de la següent manera:

$$= \sum_i^n C_{n\ fix}^i \cdot f_M^i \cdot I_e + \sum_i^n C_{n\ variable}^i \cdot 87,6 \cdot FC_i \cdot f_M^i \cdot I_e$$

Equació 13: Expressió ampliada del denominador de l'EROI

Així doncs, la equació general queda expressada de la següent forma:

$$EROI = \frac{87,6 \cdot \sum_i^n P_i \cdot FC_i}{\sum_i^n C_{nfix}^i \cdot f_M^i \cdot Ie + 87,6 \cdot \sum_i^n C_{nvariable}^i \cdot FC_i \cdot f_M^i \cdot Ie}$$

Equació 14: Expressió final de l'EROI

En l'expressió de l'EROI de sobre es pot observar com les entrades del programa (factors de càrrega, costos monetaris de les fonts energètiques i intensitat energètica) són les incògnites. Per altra banda, la potència instal·lada i les constants de Murphy són conegudes.

9.4. Resultats

En aquest apartat es comentaran els resultats obtinguts sobre l'EROI a Espanya.

En primer lloc, s'avalua l'EROI actual i, després, utilitzant el PNIEC s'analitzen dos escenaris diferents de l'EROI.

Aquests dos escenaris són deguts a dues hipòtesis realitzades. La primera de totes és que a partir de l'any 2019, els factors de càrrega de les centrals espanyoles es mantenen constant i, per tant, augmenta la demanda (tal i com es va fer en el capítol 6). La segona hipòtesi es basa en que la demanda es suposa constant i, per tant, varien els factors de càrrega de les centrals.

Cal tenir en compte que ambdós escenaris es divideixen en dos més, tenint en compte les diferents potències instal·lades per a l'any 2030 d'energia del carbó que es recull al PNIEC.

Un altra hipòtesi que s'ha fet, però que no deriva en diferents resultats analitzats, és que la potència instal·lada ha variat gradualment des de l'any 2018 fins l'any 2030.

9.4.1. Dades de partida

Per tal de realitzar els càlculs que es presentaran a continuació, s'ha partit de les dades proporcionades per Red Eléctrica Española [17] (REE) i PNIEC [6] pel que fa a les dades de generació d'electricitat i, pel que fa a les dades d'inversió monetària s'han utilitzat les dades del IDAE [13] i de la International Energy Agency [14].

TIPUS DE COST	VALOR	UNITATS
Aerogeneradors	810000	€/MW
Obra civil	100000	€/MW
I. Elèctrica	60000	€/MW
Subestació	180000	€/MW
Promoció	20000	€/MW
O&M aerogeneradors	40000	€/MWh
General i Administratiu	10000	€/MWh
Lloguer	10000	€/MW

Taula 11: Costos monetaris de l'energia eòlica [13]

TIPUS DE COST	VALOR	UNITATS
Presa	175000	€/MW
Obra civil	125000	€/MW
Turbina	200000	€/MW
Generador	175000	€/MW
Instal·lació	25000	€/MW
Marge industrial	62500	€/MW
Cost de concessió	15000	€/MW
Manteniment	4000	€/MWh
Assegurança	10000	€/MW
Operació i gestió	12500	€/MWh

Taula 12: Costos monetaris de l'energia hidràulica [13]

TIPUS DE COST	VALOR	UNITATS
Mòdul	1540000	€/MW
Altres	290000	€/MW
Inversors	250000	€/MW
Obra civil	150000	€/MW
Estructura	150000	€/MW
Marge industrial	130000	€/MW
Cablejat	10000	€/MW
Manteniment	26700	€/MWh
Lloguer	2800	€/MW
Gestió	12000	€/MWh
Assegurança	5800	€/MW

Taula 13: Costos monetaris de l'energia solar [13]

TIPUS DE COST	VALOR	UNITATS
Inversió	3378000	€/MW
Combustible	8,27	€/MWh
Operació i Manteniment	11,57	€/MWh

Taula 14: Costos monetaris de l'energia nuclear [14]

TIPUS DE COST	VALOR	UNITATS
Inversió	2356000	€/MW
Combustible	21,02	€/MWh
Cost CO ₂	14,85	€/MWh
Operació i Manteniment	5,89	€/MWh

Taula 15: Costos monetaris de l'energia del carbó [14]

TIPUS DE COST	VALOR	UNITATS
Inversió	817000	€/MW
Combustible	41,19	€/MWh
Cost CO ₂	4,3	€/MWh
Operació i Manteniment	2,67	€/MWh

Taula 16: Costos monetaris de l'energia del gas natural [14]

Cal tenir en compte que les dades provinents de la IEA no són específiques per a Espanya i que, per tant, s'ha agafat una mitjana de les diferents dades que hi havia en el document [14].

Per altra banda, l'altra dada de partida és la intensitat energètica espanyola. Com que la gran major part dels costos són de l'any 2010, la intensitat energètica escollida és la del 2010, 0.00199MWh/€.

9.4.2. EROI espanyol actual

Per al càlcul de l'EROI extens de cada energia i l'EROI de la societat espanyola es considera les dades de producció energètica d'Espanya des de l'any 2007 [17] i es suposa que tota la instal·lació de potència es fa l'any 2006.

Un cop es té en compte això, es multipliquen els costos monetaris pel seu factor de Murphy i la intensitat energètica per tal d'aconseguir els costos energètics.

A partir d'aquí, utilitzant la Taula 10 i l'Equació 14 es fa un registre de les energies invertides i obtingudes des del 2006 fins al 2017 i s'obtenen els valors d'EROI per a l'any 2017. Aquest registre es pot observar en l'Annex adjunt.

Així doncs l'EROI extens de les energies és:

ENERGIA	EROI EXTENS
EÒLICA	16
HIDRÀULICA	20
SOLAR	7
NUCLEAR	24
CARBÓ	16
GAS NATURAL	8

Taula 17: EROI extens de les energies analitzades

En la Taula 17 es pot observar com la tecnologia amb una taxa de retorn energètica més gran és l'energia elèctrica provinent de l'energia nuclear, seguida de la hidràulica.

Aquest fet és degut a diversos motius. En primer lloc, tant l'energia nuclear com l'energia hidràulica no presenten un increment de potència instal·lada significatiu durant els anys avaluats que, com a conseqüència, comporten que l'energia es pugui amortitzar amb més temps. Per altra banda, l'energia nuclear és la més utilitzada i, per tant, és la font energètica de la qual s'obté una major energia obtinguda.

En l'altre costat hi ha l'energia solar fotovoltaica amb l'EROI extens més baix degut a que any rere any s'ha augmentat la potència instal·lada i encara no ha donat temps a ser viable energèticament.

Pel que fa a l'EROI de la societat espanyola, el resultat obtingut durant el període analitzat és de 14. Amb aquest valor es pot assegurar que l'energia generada a Espanya contribuirà un correcte desenvolupament de la societat [18].

9.4.3. EROI espanyol futur. Factors de càrrega constants

Per a aquesta situació de futur s'ha proposat que les fonts energètiques mantinguin el seu factor de càrrega constant i fixat en la mitjana dels anys anteriors i que la demanda d'electricitat variï en funció de la potència instal·lada.

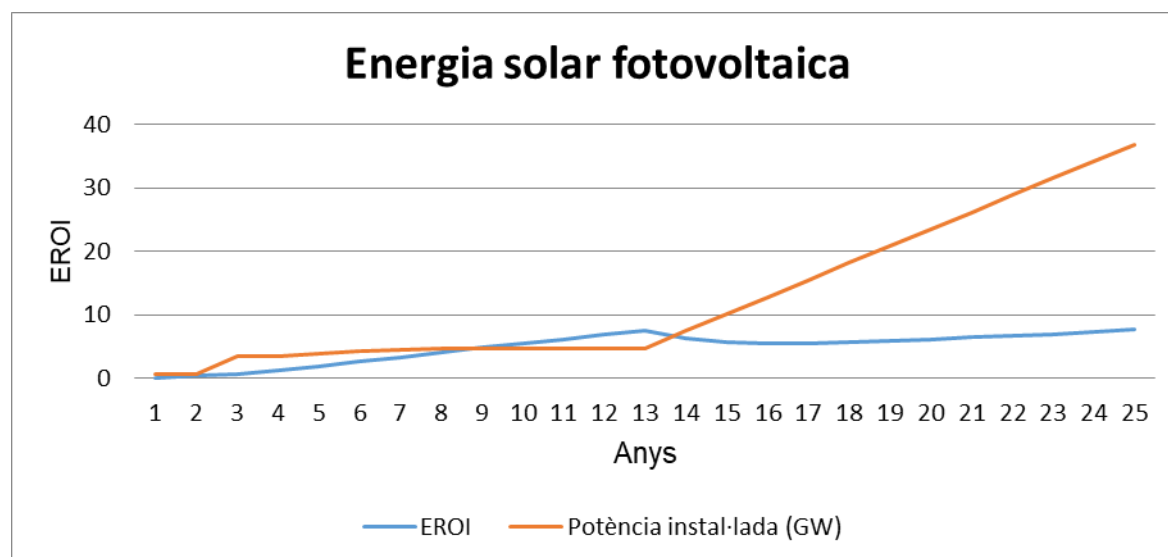
A partir de les taules anteriors es pot extreure que l'EROI extens de les energies és:

ENERGIA	EROI EXTENS
EÒLICA	19
HIDRÀULICA	36
SOLAR	8
NUCLEAR	35
CARBÓ	21/21
GAS NATURAL	13

Taula 18: EROI extens de les energies analitzades en el primer cas de futur

En aquest cas es pot observar com l'EROI extens de l'energia hidràulica s'ha incrementat degut a que no s'ha instal·lat més potència mentre que pel que fa a les altres dues energies renovables han incrementat en menor proporció degut al motiu contrari, s'instal·la la potència cada any.

Aquest fet es pot observar en el gràfic de sota on, mentre la potència instal·lada es manté gairebé constant l'EROI augmenta. Contràriament, quan la potència augmenta gradualment, l'EROI disminueix al principi per després recuperar-se poc a poc.



Gràfic 1: Representació de la potència instal·lada vs l'EROI extens de l'energia solar fotovoltaica

Pel que fa al carbó, es pot observar com tant en el cas d'eliminar totalment la potència instal·lada com en el cas en que es redueix, el EROI és el mateix i igual a 21. Aquest fet és degut a que la reducció de la potència instal·lada es fa de manera gradual en ambdós casos.

Finalment, l'EROI de la societat espanyola és de 18. Així que es pot observar que l'EROI ha augmentat respecte a l'EROI de la societat espanyola del present degut a que s'ha pogut amortitzar energèticament les centrals elèctriques.

9.4.4. EROI espanyol futur. Demanda d'electricitat constant

Finalment, la última situació analitzada consisteix en mantenir la generació d'electricitat constant i variar els factors de càrrega de les centrals energètiques per tal d'igualar la oferta a la demanda.

Cal mencionar que, per tal de variar els factors de càrrega, s'ha tingut en compte la manera en com s'ofereix electricitat en l'actualitat considerant quines tecnologies són de punta i quines són de base. Així doncs, l'ordre de les energies és energia nuclear, eòlica, solar fotovoltaica, hidràulica, gas natural i carbó.

Així doncs, a partir d'aquests valors s'extreu els EROIs extens següents:

ENERGIA	EROI EXTENS
EÒLICA	19
HIDRÀULICA	36
SOLAR	8
NUCLEAR	35
CARBÓ	18/18
GAS NATURAL	12

Taula 19: EROI extens de les energies analitzades en el segon cas de futur

En aquest cas es pot observar que els EROIs extens del carbó i del gas natural han caigut respecte al cas d'estudi anterior. Això és degut a que aquestes fonts deixen de ser útils a partir d'un cert període de temps ja que la resta d'energies ja produeixen l'energia suficient per a cobrir tota la demanda. Aquest fet és possible gràcies a la nova concepció de l'EROI perquè amb l'EROI potencial no es pot tenir en compte si una energia deixarà de generar o

seguirà fent-ho.

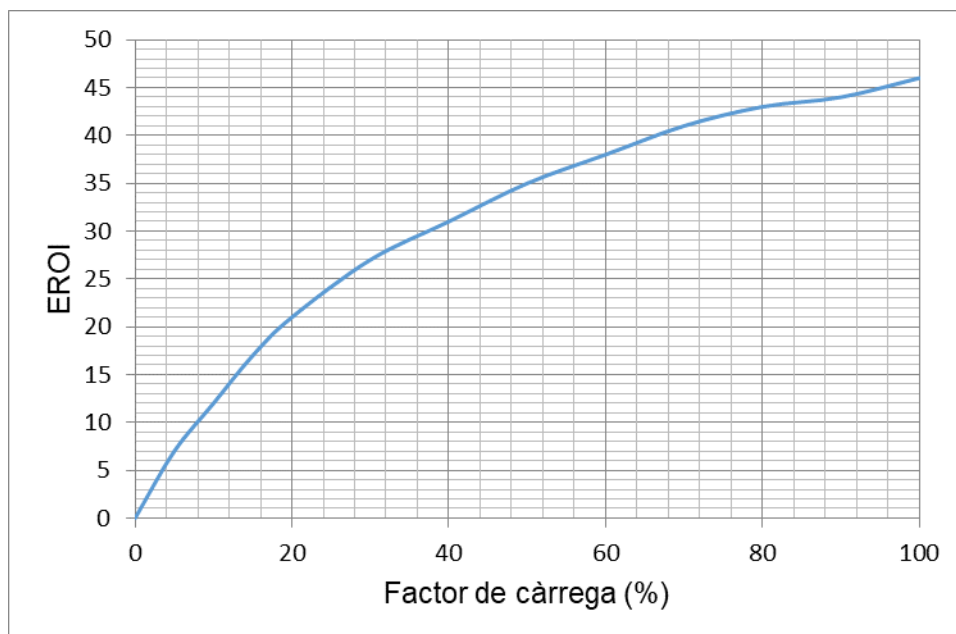
Degut al fet que l'EROI extens de les dues energies comentades anteriorment disminueix, també ho fa l'EROI de la societat espanyola que, en aquest cas, és de 17.

9.4.5. EROI i el factor de càrrega

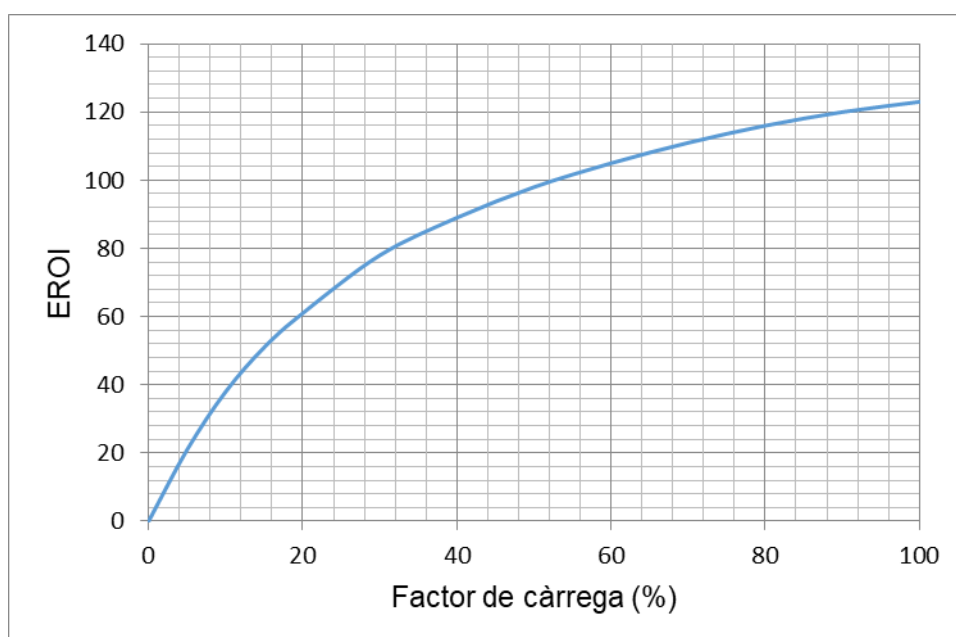
És important destacar la relació que existeix entre l'EROI i el factor de càrrega. Aquest factor està directament relacionat amb l'energia obtinguda i és un paràmetre controlable per la societat.

A continuació es mostren els EROIs de cada energia estudiada en funció del factor de càrrega. Cal tenir present que el següent estudi s'ha realitzat tenint en compte la vida útil d'una central elèctrica que per a cada cas és:

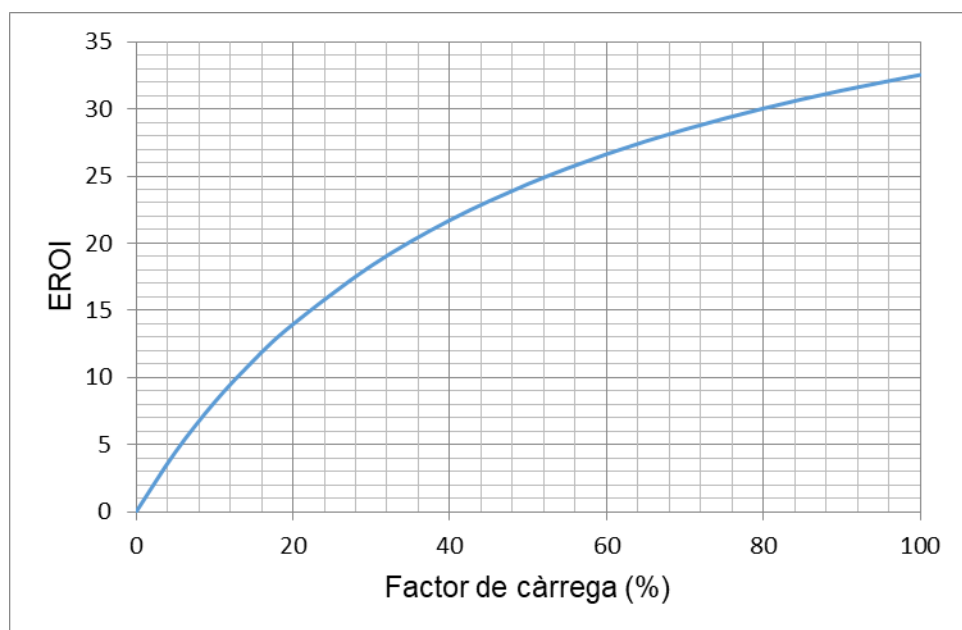
- Eòlica: 20 anys de vida útil [13]
- Hidràulica: 60 anys de vida útil [13]
- Solar: 30 anys de vida útil [13]
- Nuclear: 60 anys de vida útil [14]
- Carbó: 40 anys de vida útil [14]
- Gas natural: 30 anys de vida útil [14]



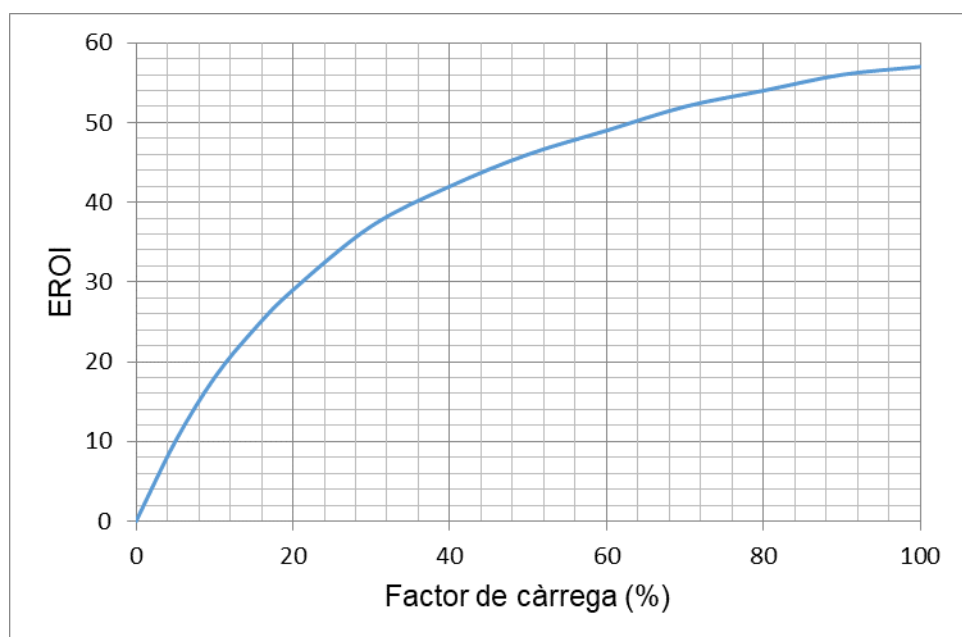
Gràfic 2: EROI vs factor de càrrega en l'energia eòlica



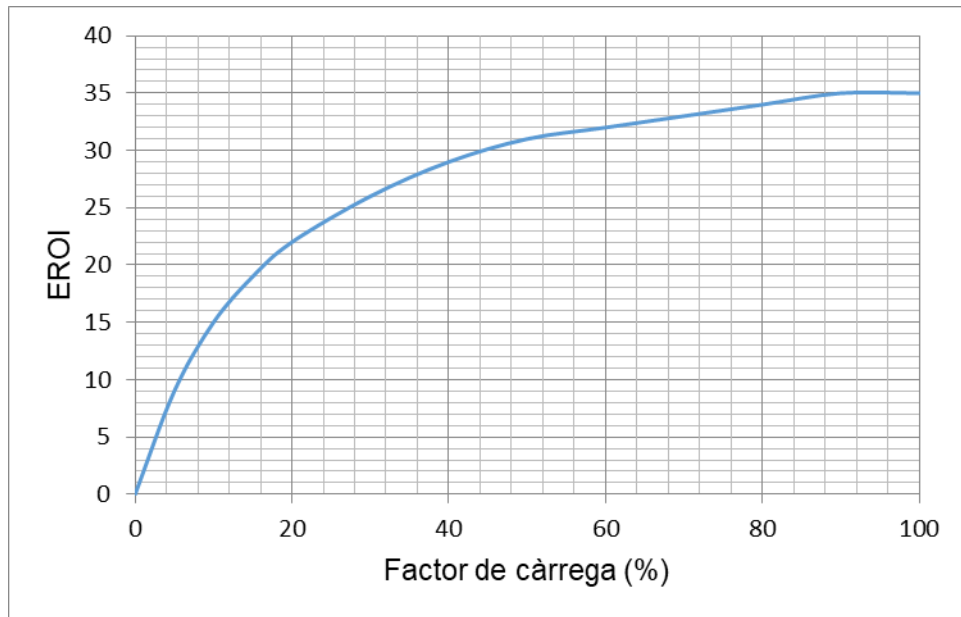
Gràfic 3: EROI vs factor de càrrega en l'energia hidràulica



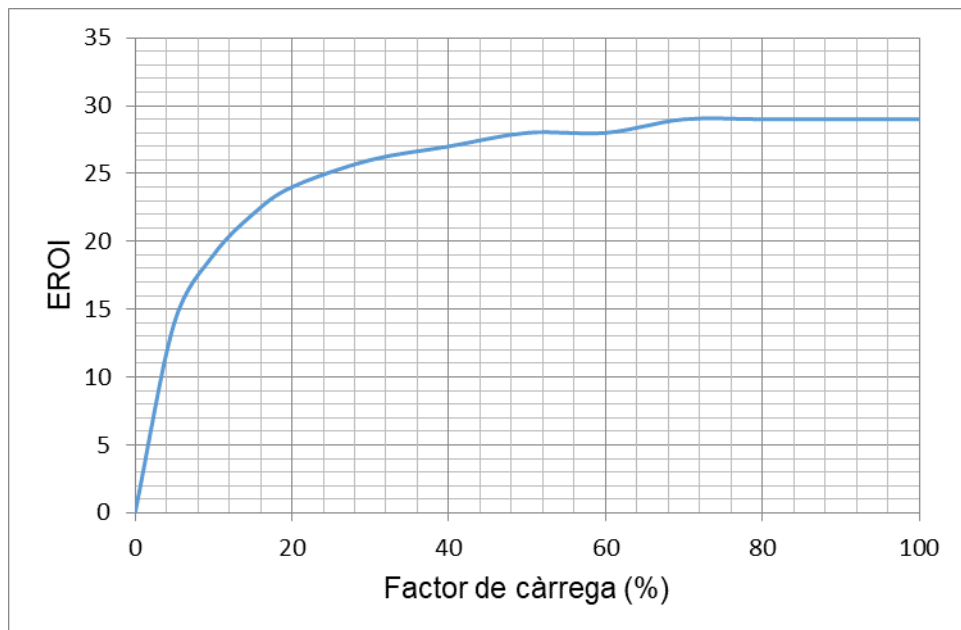
Gràfic 4: EROI vs factor de càrrega en l'energia solar



Gràfic 5: EROI vs factor de càrrega en l'energia nuclear



Gràfic 6: EROI vs factor de càrrega en l'energia del carbó



Gràfic 7: EROI vs factor de càrrega en l'energia del gas natural

Clarament, es pot observar que a mesura que s'augmenta el factor de càrrega, l'EROI augmenta en menor proporció fins a establitzar-se a un valor. Observant l'Equació 14, els costos energètics variables i la producció depenen del factor de càrrega, per tant, tendint el factor de càrrega a l'infinit l'EROI hauria de ser similar a la relació entre la producció i els costos variables, és a dir, la relació hauria de tendir a una pendent de 0.

Cal comentar que es poden observar diferències entre les diferents energies. Pel que fa a l'energia del gas natural, roman palesat que a partir del 70% del factor de càrrega el valor d'EROI es satura en 29, però si s'observa el Gràfic 4 el valor d'EROI de l'energia solar no s'estabilitza en el rang analitzat i augmenta fins a 32.

Finalment, es necessari tenir en compte que hi haurà energies que no podran treballar a certs rangs de factor de carga (Taula 4). Per tant, per exemple mai serà possible trobar un EROI de l'energia eòlica superior a 30 amb la tecnologia actual.

Conclusions

En aquest treball s'ha fet un repàs del model elèctric actual posant d'exemple l'estat espanyol. Així doncs, s'ha avaluat el mix elèctric espanyol i s'ha relacionat la producció d'electricitat amb la generació de gasos contaminants com el CO₂. Els anys on la producció d'energia renovable era menor, la producció de CO₂ augmentava, tal i com es pot observar en la Figura 12.

Com a conseqüència d'aquest fet, el Món està canviant el seu model elèctric i Espanya no és una excepció. Contemplant el marc europeu, l'estat espanyol proposa un camí a seguir consistent en reduir o eliminar la contribució al mix elèctric de l'energia procedent del carbó mentre s'augmenta la proporció generada per energies renovables.

Ara bé, en l'origen del projecte es feia la pregunta de si era prudent canviar el model elèctric només tenint en compte la generació de gasos contaminants i es proposaven altres aspectes a considerar.

El primer de tots els aspectes analitzats és la capacitat de la xarxa en front de la demanda. En el capítol 5, es posa de manifest el model elèctric que es vol aconseguir per a l'any 2030. Tenint en compte les potències instal·lades i els factors de càrrega de l'any 2017, s'arriba a la conclusió de que el nou sistema és capaç de generar tota l'energia elèctrica demandada per la població espanyola.

En l'apartat 6, s'avalua el model elèctric des del punt de vista d'impacte mediambiental, de tots els aspectes considerats el més conegut. En aquest apartat, es tenen en compte diversos factors com l'impacte visual o l'auditiu, però és difícil arribar a una conclusió amb aspectes tant subjectius. Així doncs, s'agafa com a referència els Ecopunts i s'arriba a la conclusió de que les energies que produeixen un impacte ambiental més negatiu són el carbó i la nuclear, sorprenentment l'energia solar fotovoltaica és la tercera que produeix un impacte més negatiu.

Per altra banda, en aquest mateix apartat es fa una reflexió sobre la externalització de l'impacte ambiental, és a dir, produir energia elèctrica amb un impacte negatiu fora del país. Evidentment, en un món global s'ha de tenir consciència global i no serveix de res reduir les emissions de gasos contaminants o els residus radioactius si després es compra electricitat a altres països provinent d'energies amb un gran impacte negatiu.

El tercer aspecte que es considera en el treball és la equitat energètica, que proposa com a punt positiu la accessibilitat d'un individu o població a una font energètica. Des d'aquest punt de vista, queda clar que les millors fonts energètiques són les renovables, sobretot la

solar fotovoltaica i la eòlica, i que la pitjor és l'energia nuclear.

L'últim i més important dels aspectes, en el qual es fa molta èmfasi, és l'EROI o taxa de retorn energètic. En l'apartat 8 es comença fent una introducció al concepte i se'l relaciona amb el desenvolupament humà de manera teòrica. Seguidament es distingeixen diferents tipus d'EROIs i diverses maneres de calcular-lo, arribant a la conclusió que utilitzant el mètode de Murphy és el més senzill i proper a la realitat. A continuació, es comenta l'EROI de diferents fonts energètiques i es fa una aproximació a l'EROI de la societat espanyola. Finalment, es fan una sèrie de crítiques al coeficient i es proposa una millora que s'analitza en l'apartat 9.

Així doncs, es fa una nova proposta sobre l'EROI que es pugui adaptar fàcilment al programa al qual es pretén utilitzar. Es deriva una nova fórmula i, a partir d'aquesta i dels costos monetaris de les fonts energètiques, s'extreuen uns resultats.

A partir d'aquests resultats es pot concloure que les energies nuclear i hidràulica són aquelles de les quals se'n poden extreure un millor aprofitament ja que són les energies amb un EROI més alt. Per altra banda, l'energia solar fotovoltaica és la menys rendible durant el període analitzat en els tres casos proposats en el treball.

Per altra banda, es fa un anàlisi del factor de càrrega versus l'EROI extens de cada energia per a observar com evoluciona la amortització de l'energia invertida en funció de l'ús de la tecnologia. Tal i com s'observa en l'apartat 9.4.5, a mesura que el factor de càrrega l'EROI extens tendeix a estabilitzar-se a un valor constant.

En aquest treball no es pretén classificar les fonts energètiques en millor o pitjor i, a partir d'aquí, eliminar aquelles considerades com a més nocives. Totes les tecnologies tenen punts positius i negatius i és la societat qui ha de decidir quines seran les energies a utilitzar, tenint en compte els punts exposats anteriorment.

Si la societat vol apostar per una via més sostenible i ecològica, eliminant tota la producció no renovable per renovable, ha de tenir en compte que la única via possible passa per reduir el consum d'energia elèctrica i, que tot i això, l'impacte ambiental que produirà seguirà sent negatiu.

Agraïments

Per finalitzar aquest treball m'agradaria agrair al meu tutor, Daniel Suárez, per l'ajuda prestada durant aquests mesos de feina i a la meva família i amics per aguantar hores i hores de conversa sobre l'EROI.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] Agencia Europea de Medio Ambiente, «Agencia Europea de Medio Ambiente» 25 9 2017. [En línea]. Available: <https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2017-configuracion-del-futuro/articulos/la-energia-y-el-cambio-climatico>. [Último acceso: 25 3 2019].
- [2] BP, «BP Statistical Review of World Energy» BP, Londres, 2018.
- [3] REE, «Red Eléctrica Española» 27 04 2019. [En línea]. Available: <https://demanda.ree.es/visiona/peninsula/demanda/acumulada/2019-04-27>. [Último acceso: 27 04 2019].
- [4] M. Planelles, «El País» 29 12 2018. [En línea]. Available: https://elpais.com/sociedad/2018/12/28/actualidad/1546022046_742137.html. [Último acceso: 01 05 2019].
- [5] Carlos E. Cué, «El País» 20 03 2011. [En línea]. Available: https://elpais.com/diario/2011/03/20/internacional/1300575627_850215.html. [Último acceso: 05 05 2019].
- [6] Ministerio para la Transición Ecológica, «Plan Nacional Integrado de Energía y Clima» Ministerio para la Transición Ecológica, Madrid, 2019.
- [7] C. A.S. Hall i. K. A. Klitgaard, *Energy and the Wealth of Nations*, Londres: Springer, 2012.
- [8] J. G. Lambert, S. B. Balogh i C. A.S. Hall, «EROI of different fuels and the implications for society» *Energy Policy*, vol. I, nº 64, pp. 141-152, 2014.
- [9] D. J. Murphy, C. A.S. Hall, M. Dale i C. Cleveland, «Order from chaos: A Preliminary Protocol for Determining EROI for Fuels» *Sustainability*, pp. 1888-1907, 2011.
- [10] Gas Natural, «El impacto ambiental de las distintas fuentes energéticas de generación eléctrica».
- [11] I. Illich, *Energy and Equity*, Londres: Marion Boyars Publishers, 1974.

- [12] E. Bayona, «España compra electricidad 'sucia' a Marruecos mientras impulsa el cierre de las térmicas» *Público*, 04 06 2019.
- [13] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), «Plan de energías renovables 2011-2020» Madrid, 2011.
- [14] International Energy Agency (IEA), «Projected costs of generating electricity» Paris, 2010.
- [15] Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía (IDAE), «Impactos ambientales de la producción eléctrica: Análisis de ciclo de vida de ocho tecnologías de generación eléctrica» Madrid, 1999.
- [16] Radio y Televisión Española, «rtve» 10 10 2018. [En línea]. Available: <http://www.rtve.es/noticias/20181010/2033-habra-49-millones-habitantes-espana-uno-cada-4-sera-mayor-65-anos/1816304.shtml>. [Último acceso: 12 06 2019].
- [17] Red Eléctrica Española, «El sistema eléctrico español 2017» Madrid, 2018.
- [18] P. Prieto i C. A.S. Hall, Spain's photovoltaic revolution, New York: Springer, 2013.
- [19] V. Bell, J. v. d. Pool i S. Crabtree, Dirección, *Future Earth*. [Película]. Regne Unit: BBC, 2013.
- [20] Global Warming Petition Project, «Petition project» 2007. [En línea]. Available: <http://www.petitionproject.org/>. [Último acceso: 17 06 2019].
- [21] Ministerio de fomento, «Documento básico ahorro de energía» Madrid, 2018.
- [22] P. d. Salas, «rtve» 06 08 2017. [En línea]. Available: <http://www.rtve.es/noticias/20170806/centrales-nucleares-espana-seis-activo-entre-29-36-anos-antiguedad/1592460.shtml>. [Último acceso: 18 06 2019].
- [23] Energy Information Administration, «Electric Power,» Washington DC, 2019.
- [24] Ministeria de energía, turismo y agenda digital «La energía en España 2016,» Madrid, 2017.
- [25] L. I. Gómez Fernández, «Libre mercado,» 02 03 2014. [En línea]. Available: <https://www.libremercado.com/2014-03-02/el-viento-la-magia-y-la-energia-eolica-1276512028/>. [Último acceso: 22 06 2019].

- [26] Sistema español de inventario de emisiones, «Metodologia de estimación de emisiones,» Madrid, 2016.